REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR –ANNABA
FACULTE DE MEDECINE
DEPARTEMENT DE PHARMACIE

THESE

Présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences Médicales

Discipline : Chimie Analytique

THEME

APPORT DE LA CHIMIOMETRIE COMBINEE À LA SPECTROPHOTOMETRIE INFRAROUGE DANS LE DIAGNOSTIC DES LITHIASES URINAIRES

Présentée par : LABOUIZ Amina

Maitre assistante Hospitalo-Universitaire en Chimie Analytique

Directeur de Thèse :	**Pr HADEF Youcef**	**Faculté de Médecine d'Annaba**
Co-Directeur de Thèse :	**Pr LALAOUNA Abd El Djalil**	**Faculté de Médecine de Constantine**

Le Jury

Pr. MERAH Abd El Ali	**Président**	**Faculté de Médecine d'Annaba**
Pr. BOUDIS Abd El Hakim	**Membre**	**Faculté de Médecine d'Alger**
Pr. LAOUFI Nardjess	**Membre**	**Faculté de Médecine d'Alger**
Pr. HAIAHEM Sina	**Membre**	**Faculté de Médecine d'Annaba**

N° d'ordre :…… **Année :**

2024/2025

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR –ANNABA
FACULTE DE MEDECINE
DEPARTEMENT DE PHARMACIE

THESE

Présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences Médicales

Discipline : Chimie Analytique

THEME

APPORT DE LA CHIMIOMETRIE COMBINEE À LA SPECTROPHOTOMETRIE INFRAROUGE DANS LE DIAGNOSTIC DES LITHIASES URINAIRES

Présentée par : LABOUIZ Amina

Maitre assistante Hospitalo-Universitaire en Chimie Analytique

Directeur de Thèse :	**Pr HADEF Youcef**	**Faculté de Médecine d'Annaba**
Co-Directeur de Thèse :	**Pr LALAOUNA Abd El Djalil**	**Faculté de Médecine de Constantine**

Le Jury

Pr. MERAH Abd El Ali	**Président**	**Faculté de Médecine d'Annaba**
Pr. BOUDIS Abd El Hakim	**Membre**	**Faculté de Médecine d'Alger**
Pr. LAOUFI Nardjess	**Membre**	**Faculté de Médecine d'Alger**
Pr. HAIAHEM Sina	**Membre**	**Faculté de Médecine d'Annaba**

N° d'ordre :…… **Année :**

2024/2025

DEDICACE

*Grace à **DIEU** et son aide, j'ai pu enfin réaliser ce modeste travail, que je dédie à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin avec mes sentiments les plus profonds, particulièrement :*

À ma chère maman,

Pour ton amour infini, tes sacrifices silencieux, ta patience et tes prières qui m'ont portée dans les moments les plus durs.

Tu as cru en moi même dans les moments où je doutais de moi.

Ce travail, fruit d'années de persévérance, est avant tout le tien. Que Dieu te protège et t'accorde une vie pleine de sérénité et de santé.

*À **mon père**, pour sa présence bienveillante, ses conseils et son soutien.*

*À ma famille, en particulier mes frères : **Cherif-Riad-Akrem**, pour leur soutien constant, leurs encouragements et leur bienveillance.*

*À ma **belle-sœur Sara**, pour sa douceur et sa présence.*

*Une pensée toute spéciale à mes neveux **Amir** et **Yanis**, mes petits anges, qui illuminent ma vie par leur innocence et leur sourire.*

*À mes amies et collègues : **Leila – Afef - Fatima– Zhour-Nesrine – Boutheina – Rania** qui ont su m'accompagner avec patience humour et réconfort tout au long de ce parcours.*

Avec toute ma gratitude.

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la santé, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à mon encadrant **Pr HADEF YOUCEF,** que je considère bien plus qu'un simple directeur de thèse : un véritable guide, un modèle et une figure paternelle tout au long de ce parcours. Par sa rigueur, sa générosité, sa disponibilité inlassable et ses conseils éclairés, il a su m'inspirer, m'encadrer avec bienveillance, et me pousser à donner le meilleur de moi-même. Merci pour votre confiance, votre patience et votre humanité.

Mes remerciements les plus sincères vont également à mon co-encadrant, **Pr LALAOUNA ABD EL DJALIL** pour le temps précieux qu'il m'a consacré durant les phases les plus délicates de l'analyse, pour sa rigueur scientifique, sa bienveillance et son soutien indéfectible. Votre accompagnement a été pour moi d'une aide précieuse, à la fois sur le plan méthodologique et humain.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au **Professeur Abdelali Merah**, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de cette thèse, ainsi que pour son accompagnement bienveillant tout au long de mon parcours.

Mes sincères remerciements vont également aux **Professeurs Abdelhakim Boudis, Laoufi Nardjes et Haiahem Sina** qui me font l'honneur d'évaluer ce travail. Leur regard critique, nourri de leur expertise et de leur expérience, contribue à enrichir considérablement cette recherche.

Une pensée spéciale pour **Dr Mekahlia**, avec qui j'ai partagé bien plus qu'un travail. Grâce à ta présence, à ta sincérité, à nos échanges et à ton soutien indéfectible, ce parcours a pris un tout autre sens. Tu es devenue comme une sœur, et je t'en remercie profondément.

Je remercie tout particulièrement **Dr Gouasmi** pour son accompagnement généreux depuis mon résidanat, ses conseils avisés et son amitié précieuse.

Ma reconnaissance va également à **Dr Samoud**, pour ses conseils précieux, ses remarques toujours pertinentes, son soutien constant et ses encouragements sincères. Elle n'a jamais hésité à m'aider, partageant généreusement ses connaissances avec une bonté rare.

Je remercie particulièrement **Dr Houamria** et Dr **Boutefnouchet**, mes compagnons de route dans cette aventure. Nous avons traversé ensemble les hauts et les bas. Leur présence, leur soutien et leur énergie ont rendu ce parcours plus humain, plus léger et infiniment plus fort.

Mes remerciements vont également à **Dr Harbi**, pour son soutien sincère et ses encouragements constants. Il m'a tendu la main dans les moments les plus difficiles, avec bienveillance et générosité.

Je tiens à remercier du fond du cœur **Dr Zerdaoui, Dr Soltani, Dr Bouledroua**, qui m'ont soutenue avec bienveillance et loyauté tout au long de ce parcours. Merci à vous trois pour votre présence constante, vos encouragements, vos conseils et surtout pour avoir toujours cru en moi. Vous m'avez tendu la main dans les moments de doute, et vous avez toujours su me motiver à persévérer. Votre joie sincère face à mes avancées a été pour moi une source précieuse de force et de gratitude.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toute l'équipe du laboratoire de chimie analytique de la Faculté de Médecine d'Annaba**,** pour leur disponibilité, leur accompagnement technique et humain

TABLE DES MATIERES

Liste des tableaux I
Liste des figures III
Liste des annexes ……..……...……VIII
Liste des abréviations IX
INTRODUCTION…….……..……1

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I. LITHIASE URINAIRE

1 ANATOMIE ET PHYSIOLOGIE DE L'APPAREIL URINAIRE 4
1.1 ANATOMIE DE L'APPAREIL URINAIRE 4
1.1.1 Anatomie des reins 4
1.1.2 Anatomie structurelle d'un néphron 6
1.2 PHYSIOLOGIE URINAIRE ET RÔLE DU REIN DANS L'HOMÉOSTASIE 12
1.2.1 Physiologie des tubules du néphron 12
1.2.2 Physiologie des voies urinaires basses 13
1.2.3 Pathologies de l'appareil urinaire 14
2 LITHIASE URINAIRE 15
2.1 DEFINITION DE LA LITHIASE URINAIRE 15
2.2 APERÇU HISTORIQUE SUR LA LITHIASE URINAIRE 16
2.3 ÉPIDÉMIOLOGIE DES CALCULS RÉNAUX 16
2.3.1 À l'échelle mondiale 16
2.3.2 En Algérie 16
2.4 CAUSES ET FACTEURS DE FORMATION DU CALCUL 16
2.4.1 Facteurs nutritionnels 17
2.4.2 Sexe 19
2.4.3 Infection urinaire 19
2.4.4 Anomalies morpho-anatomiques des voies urinaires 21
2.4.5 Facteur génétique 21
2.4.6 Syndrome métabolique et lithiase urinaire 21
2.4.7 pH urinaire 22
2.4.8 Lithiases médicamenteuses 22
2.4.9 Autres facteurs 23

2.5 PROMOTEURS ET INHIBITEURS 23
2.5.1 Promoteurs de la lithogénèse 23
2.5.2 Inhibiteurs de la lithogénèse 24
2.6 MÉCANISME D'INITIATION DE FORMATION DES CALCULS RÉNAUX 24
2.7 LITHOGENÈSE 25
2.7.1 Étapes de la lithogenèse 25
2.8 STRUCTURE ET COMPOSITION D'UN CALCUL URINAIRE 26
2.9 CLASSIFICATION MORPHO-CONSTITUTIONNELLE DES CALCULS URINAIRES 27
2.9.1 Type I 27
2.9.2 Type II 29
2.9.3 Type III 29
2.9.4 Type IV 31
2.9.5 Type V 32
2.9.6 Type VI 33
2.9.7 Type VII 33
2.9.8 Formes mixtes 33
2.10 EXPLORATION DE LA LITHIASE URINAIRE 34
2.10.1 Interrogatoire 35
2.10.2 Symptomatologie 35
2.10.3 Diagnostic radiologique 35
2.10.4 Formes cliniques 37
2.10.5 Examens biologiques de première intention 37
2.11 TRAITEMENT MÉDICAL PRÉVENTIF DES LITHIASES URINAIRES 38
2.11.1 Traitement médical de douleur néphrétique 39
2.11.2 Traitement médical de lithiase calcique 39
2.11.3 Traitement médical de la lithiase urique 40
2.11.4 Traitement médical de lithiase infectieuse 41
2.11.5 Traitement médical de lithiase cystinique 41
2.12 TRAITEMENT UROLOGIQUE DES LITHIASES URINAIRES 42
2.12.1 Lithotritie extracorporelle (LEC) 42
2.12.2 Lithotritie intracorporelle 43
2.12.3 Chirurgie ouverte (classique) 43

CHAPITRE II: MÉTHODES DE CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES LITHIASES URINAIRES

1 INTRODUCTION 44

2 TECHNIQUES CHIMIQUES 44

2.1 MÉTHODES QUALITATIVES 44

2.1.1 Avantages 44

2.1.2 Limites 44

2.2 MÉTHODES QUANTITATIVES 45

3 TECHNIQUES PHYSIQUES 45

3.1 OBSERVATION MORPHOLOGIQUE À LA LOUPE BINOCULAIRE: 45

3.1.1 Principe 45

3.1.2 Appareillage 46

3.1.3 Applications de la loupe binoculaire 46

3.1.4 Avantages de la loupe binoculaire 47

3.1.5 Limites 48

3.2 SPECTROMÉTRIE PAR RÉFLEXION DANS L'IR MOYEN 48

3.2.1 Principe 48

3.2.2 Modes de mesure 49

3.2.3 Spectrométrie par réflexion totale atténuée (ATR) 50

- Conséquences spectrales 52
- Comparaisons spectrales et bibliothèques 53

3.2.4 Appareillage 53

3.2.5 Applications de la spectrométrie dans l'IR moyen 54

3.2.6 Avantages 55

3.2.7 Limitations 56

3.3 ANALYSES THERMIQUES 56

3.3.1 Analyse thermogravimétrique (ATG) 57

3.3.2 Calorimétrique différentielle à balayage 62

CHAPITRE III: CHIMIOMÉTRIE

1 FONDEMENTS DE LA CHIMIOMÉTRIE 67

1.1 INTRODUCTION 67

1.2 DÉFINITIONS 67

1.3 CONTEXTE D'APPLICATION : DIAGNOSTIC DES LITHIASES URINAIRES 68

1.4 Classification des approches chimiométriques 69
1.4.1 Analyses qualitatives 69
1.4.2 Analyses quantitatives 69
1.4.3 Méthodes exploratoires (non supervisées) 69
1.4.4 Méthodes de régression supervisée 70
1.4.5 Méthodes connexionnistes ou algorithmes à noyaux 70
1.5 Présentation des données 70
1.5.1 Données spectroscopiques 71
1.5.2 Données cliniques, biologiques et morphologiques 71
2 APPROCHES EXPLORATOIRES 72
2.1 1. Principe 72
2.2 Analyses bivariées 73
2.2.1 Principe 73
2.3 Rôle dans le diagnostic 73
2.4 Types de tests 73
2.5 Limites 74
2.6 Analyse en composantes principales (ACP) 74
2.6.1 Principe 74
2.6.2 Application aux lithiases urinaires 75
2.6.3 Prétraitements 75
2.6.4 Interprétation 76
2.6.5 Limites 76
3 MODÉLISATION PAR RÉGRESSION 76
3.1 Fondements de la modélisation par régression 76
3.2 Régression linéaire multiple (MLR) 77
3.2.1 Principe 77
3.2.2 Limites 78
3.3 Régression sur composantes principales (PCR) 78
3.3.1 Principe 78
3.3.2 Avantages 79
3.3.3 Limites 79
3.4 Régression des moindres carrés partiels (PLS) 79
3.4.1 Principe 79

3.4.2 Application 80
3.4.3 Avantages 80
3.4.4 Limites 80
3.5 Régression Ridge 81
3.5.1 Principe 81
3.5.2 Avantages 81
3.5.3 Limites 81
4 MODÉLISATION CONNEXIONNISTE 82
4.1 Principe 82
4.2 Machines à vecteurs de support pour la régression (SVR) 82
4.2.1 Principe 82
4.2.2 Application 82
4.2.3 Avantages 83
4.2.4 Limites 83
5 DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES CHIMIOMÉTRIQUES 83
5.1 Étapes du développement des modèles chimiométriques 83
5.2 Inspection des données 84
5.2.1 Évaluation 84
5.2.2 Colinéarité 84
5.2.3 Détection des valeurs aberrantes (Outliers) 85
5.3 Prétraitement 85
5.3.1 Centrage-réduction 85
5.3.2 Dérivation 86
5.3.3 Lissage 86
5.3.4 Autres prétraitements 86
5.4 Sélection des variables 86
5.4.1 Objectifs 86
5.4.2 Approches statistiques 87
5.4.3 Approches régularisées 87
5.4.4 Approches basées sur modèles 87
5.4.5 Critères 88
6 ÉVALUATION ET VALIDATION DES MODÈLES 88
6.1 Objectifs 88
6.2 Métriques d'évaluation 89

6.3 MÉTHODES DE VALIDATION 90
6.3.1 Validation croisée 90
6.3.2 Validation externe 90
6.3.3 Comparaison 91
6.4 LIMITES DE L'ÉVALUATION ET VALIDATION 91
6.4.1 Sensibilité des métriques 91
6.4.2 Taille des ensembles de données 91
6.4.3 Représentativité des données 91
6.4.4 Complexité des modèles 92

PARTIE PRATIQUE

1 INTRODUCTION 93

CHAPITRE I: COLLECTE DES DONNÉES ET SÉLECTION DES ÉCHANTILLONS

1 INTRODUCTION 94

2 ÉCHANTILLONS ÉTUDIÉS 94

2.1 COLLECTE DES DONNÉES CLINIQUES ET BIOLOGIQUES 94
2.2 SÉLECTION DES ÉCHANTILLONS 95
2.2.1 Critères d'inclusion et d'exclusion 95
2.3 ESTIMATION DE LA TAILLE DE L'ÉCHANTILLON 96
2.3.1 Profil démographique et clinique des patients inclus 97

CHAPITRE II: ANALYSE MORPHOLOGIQUE DES LITHIASES URINAIRES

1 INTRODUCTION 101
2 MATÉRIELS 101
3 MÉTHODES 101
3.1 ÉTAPE PRÉ-ANALYTIQUE 101
3.1.1 Nettoyage des échantillons 102
3.1.2 Préparation des échantillons pour l'analyse 102
3.2 ÉTAPE ANALYTIQUE 103
3.2.1 Observation et description morphologique 103
3.3 ÉTAPE POST-ANALYTIQUE 104
3.3.1 Classification et exploitation des résultats 104
4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS 105

4.1 Classification et répartition des types des lithiases urinaires 105
4.2 Analyse comparative des types morphologiques 106
4.3 Description des caractéristiques morphologiques observées 111
4.3.1 Morphologies de l'oxalate de calcium : 111
4.3.2 Morphologies de la lithiase urique et purique : 118
4.3.3 Morphologie de la lithiase phosphocalcique 121
5 CONCLUSION 125

CHAPITRE III : CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES LITHIASES URINAIRES

1 INTRODUCTION 124
2 MATÉRIEL 125
2.1 Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IR-TF) 125
2.1.1 Échantillons 125
2.1.2 Instrumentation 125
2.1.3 Outils de manipulation et de préparation 125
2.2 Analyse Thermique (DSC/TG) 125
2.2.1 Échantillons 125
2.2.2 Instrumentation 126
2.2.3 Accessoires 126
3 MÉTHODES 126
3.1 Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IR-TF) 126
3.1.1 Étape pré-analytique 126
3.1.2 Étape analytique 132
3.1.3 Étape post-Analytique 132
3.2 Analyse Thermique (DSC/TG/ATD) 133
3.2.1 Étape pré-Analytique 133
4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS 139
4.1 Oxalate de calcium (COM et COD) 139
4.1.1 Analyse des standards pures de référence (COM et COD) : ... **Erreur ! Signet non défini.**
4.1.2 Analyse des mélanges artificiels COM+COD ..... **Erreur ! Signet non défini.**
4.1.3 Analyse des échantillons réelles oxaliques 139
4.2 Acide urique et purine 148

4.2.1 Analyse des standards pures de référence (AU0-AU2-UR).... **Erreur ! Signet non défini.**
4.2.2 Analyse des mélanges artificiels ..... **Erreur ! Signet non défini.**
4.2.3 Analyse des échantillons puriques ..... **Erreur ! Signet non défini.**
4.2.4 Analyse des mélanges inter-familles 162
4.3 LITHIASES PHOSPHATÉES 167
4.3.1 Analyse des standards purs : CARB, STR, BRU ..... **Erreur ! Signet non défini.**
4.3.2 Analyse des mélanges artificiels ..... **Erreur ! Signet non défini.**
4.3.3 Analyse des échantillons réels 167
4.3.4 Analyse des mélanges inter-familles 170
5 CONCLUSION 173

CHAPITRE IV : ANALYSE STATISTIQUE ET CHIMIOMÉTRIQUE DES DÉTERMINANTS MORPHO-CLINIQUES ET SPECTROSCOPIQUES DES LITHIASES URINAIRES

1 INTRODUCTION 227
2 MATÉRIEL ET MÉTHODES 228
2.1 DONNÉES UTILISÉES 228
2.2 OUTILS ET LOGICIELS UTILISÉS 229
3 MÉTHODES 229
3.1 ÉTAPE PRÉ-ANALYTIQUE 229
3.1.1 Codage et prétraitement des données : 229
3.2 ÉTAPE ANALYTIQUE : 232
3.2.1 Analyse bivariée des relations entre variables : 232
3.2.2 Analyses multivariées et chimiométriques : 233
3.3 ÉTAPE POST-ANALYTIQUE : INTERPRÉTATION, SÉLECTION ET VALIDATION DES MODÈLES 235
4 RÉSULTATS ET DISCUSSION 236
4.1 RÉSULTATS DES ANALYSES BIVARIÉES 236
4.1.1 Comparaisons par paires des variables qualitatives binaires 236
4.1.2 Comparaisons par paires des variables qualitatives nominales. 242
4.1.3 Comparaisons par paires des variables quantitatives 255
4.1.4 Analyse des relations entre variables quantitatives et qualitatives binaires 269

4.1.5 Analyse des relations entre variables quantitatives et variables qualitatives nominales 276
4.1.6 Analyse des relations entre variables qualitatives binaires et nominales dans la lithiase urinaire 295
4.2 MÉTHODES CHIMIOMÉTRIQUES MULTIVARIÉES 297
4.2.1 Évaluation des performances globales des modèles 298
4.2.2 Identification des meilleurs modèles par composé 301
4.2.3 Analyse des variables sélectionnées 302
4.2.4 Prédictions et validation sur les échantillons réels 303
4.2.5 Analyse en Composantes Principales (ACP) 307
4.3 CONCLUSION 318

CONCLUSION 327
PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES
ANNEXES
RESUME

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 . RÔLE DES HABITUDES ALIMENTAIRES DANS LA LITHOGÉNÈSE [44,48,49]. 19
TABLEAU 2 . PRINCIPAUX BACTÉRIES URÉOLYTIQUES [39,68]. 20
TABLEAU 3 . MÉDICAMENTS ET LITHIASES 22
TABLEAU 4 . PRINCIPAUX PROMOTEURS ET INHIBITEURS 23
TABLEAU 5 . INHIBITEURS DE LA CRISTALLISATION MACROMOLÉCULAIRES 24
TABLEAU 6 . NATURE DES COMPOSANTS D'UN CALCUL URINAIRE 27
TABLEAU 7 . CARACTÉRISTIQUES DES CALCULS DE TYPE I (WHEWELLITE) [39] 28
TABLEAU 8 . CARACTÉRISTIQUES DES CALCULS DE TYPE II [39] 29
TABLEAU 9 . CARACTÉRISTIQUES DES CALCULS DE TYPE III [39] 30
TABLEAU 10 . CARACTÉRISTIQUES DES CALCULS DE TYPE IV [39] 31
TABLEAU 11 . CARACTÉRISTIQUES DES CALCULS DE TYPE V[56] 32
TABLEAU 12 . CARACTÉRISTIQUES DES CALCULS DE TYPE VI [39] 33
TABLEAU 13 . CALCULS MIXTES [39] 34
TABLEAU 14 . EVALUATION CLINIQUE DES PATIENTS ATTEINTS DE NÉPHROLITHIASE 38
TABLEAU 15 . DIFFÉRENTS TYPES DE CRISTAUX ATR [111]. 54
TABLEAU 16 . DISTRIBUTION DES CALCULS ANALYSÉS 105
TABLEAU 17 . NOMBRE ET PROPORTIONS DES TYPES ET SOUS-TYPES MORPHO-CONSTITUTIONNELS DES LITHIASES ANALYSÉES SELON LE SEXE. 106
TABLEAU 18 . TEST DE PERFORMANCE DE L'ÉCHELLE DE NOMBRE D'ONDE DE NOTRE SPECTROPHOTOMÈTRE SUR FILM DE POLYSTYRÈNE 127
TABLEAU 19: TEST DE PERFORMANCE DE LA RÉSOLUTION SPECTRALE DE NOTRE SPECTROPHOTOMÈTRE SUR FILM DE POLYSTYRÈNE 127
TABLEAU 20 . MESURE DU BRUIT 128
TABLEAU 21 . DONNÉES FICTIVES (EN ABSORBANCE) AUTOUR DU PIC 129
TABLEAU 22 . TEST DE PERFORMANCE DE LA REPRODUCTIBILITÉ SPECTRALE DE NOTRE SPECTROPHOTOMÈTRE SUR UN ÉCHANTILLON DE RÉFÉRENCE (CALCITE PURE). 130
TABLEAU 25 . VÉRIFICATION DES PERFORMANCES DE LA TEMPÉRATURE DU DSC SUR $CuSO_4 \cdot 5\ H_2O$ 133
TABLEAU 26 . VÉRIFICATION DES PERFORMANCES DU TGA SUR $CuSO_4 \cdot 5\ H_2O$ 134
TABLEAU 27 . TEST DE PERFORMANCE DE LA REPRODUCTIBILITÉ THERMIQUE DE NOTRE ANALYSEUR THERMIQUE SUR UN ÉCHANTILLON DE RÉFÉRENCE ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$). 135
TABLEAU 28 . STABILITÉ DE LA LIGNE DE BASE POUR L'ATG 136
TABLEAU 29 . STABILITÉ DE LA LIGNE DE BASE POUR LA DSC 137
TABLEAU 35 . ASSOCIATIONS SIGNIFICATIVES ENTRE VARIABLES QUALITATIVES BINAIRES PAR CATEGORIE 237
TABLEAU 36 : ASSOCIATIONS MODÉRÉES ENTRE LES VARIABLES QUALITATIVES NOMINALES 243
TABLEAU 37 . ASSOCIATIONS FORTES ENTRE LES VARIABLES QUALITATIVES NOMINALES 247
TABLEAU 38 . LES ASSOCIATIONS TRÈS FORTES ENTRE LES VARIABLES QUALITATIVES NOMINALES 251
TABLEAU 39 . PRINCIPALES CORRÉLATIONS LINÉAIRES PAR PAIRES DES VARIABLES QUANTITATIVES 256
TABLEAU 40 . COMPARAISONS DES VARIABLES QUANTITATIVES SELON L'HISTORIQUE DE LA LITHIASE 269
TABLEAU 41 . COMPARAISONS DES VARIABLES QUANTITATIVES SELON L'ANOMALIE MÉTABOLIQUE 271
TABLEAU 42 . COMPARAISONS DES VARIABLES QUANTITATIVES SELON LA PRÉSENCE D'UNE INFECTION URINAIRE CONNUE 272
TABLEAU 43 . COMPARAISONS DES VARIABLES QUANTITATIVES SELON LA PRISE DE MÉDICAMENT 274
TABLEAU 44 . COMPARAISONS DES VARIABLES QUANTITATIVES SELON LA LOCALISATION DU CALCUL 277
TABLEAU 45 . COMPARAISONS DE LA DURETÉ DE LA TEXTURE (ZONE 1) SELON LES VARIABLES DÉMOGRAPHIQUES 278
TABLEAU 46. COMPARAISONS DE LA DURETÉ DE LA TEXTURE (ZONE 1) SELON LES VARIABLES BIOLOGIQUES 280
TABLEAU 47 . INFLUENCE DES PARAMÈTRES BIOLOGIQUES SUR LA MORPHOLOGIE DE LA SURFACE (ZONE 2) 283
TABLEAU 48 . INFLUENCE DES PARAMÈTRES SUR LA STRUCTURE DE LA COUCHE INTERNE 286

TABLEAU 49 . INFLUENCE DES PARAMÈTRES SUR LA POROSITÉ ET LA STRATIFICATION 290
TABLEAU 50. INFLUENCE DES PARAMÈTRES SUR LES CARACTÉRISTIQUES LES PLUS SIGNIFICATIVES DU NOYAU . 293
TABLEAU 51 . ASSOCIATIONS SIGNIFICATIVES ENTRE VARIABLES QUALITATIVES BINAIRES ET NOMINALES 295
TABLEAU 52 . MEILLEURS MODÈLES DE RÉGRESSION POUR CHAQUE COMPOSÉ LITHIASIQUE 301
TABLEAU 53 . MÉTRIQUES DE PERFORMANCE PAR COMPOSÉ MAJORITAIRE 305

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : POSITION DU SYSTÈME URINAIRE AU VOISINAGE DES AUTRES ORGANES 5
FIGURE 2: STRUCTURE EXTERNE DU REIN [33]..... 5
FIGURE 3 : SCHÉMA D'ANATOMIE INTERNE DU REIN [30] 6
FIGURE 4 ; ANATOMIE STRUCTURALE DU NÉPHRON [34] 6
FIGURE 5 : STRUCTURE DU CORPUSCULE RÉNAL DE MALPIGHI. 7
FIGURE 6 : LOCALISATION DES PRINCIPAUX PROCESSUS DE TRANSPORT DANS LES TUBULES DE NÉPHRO [38]..... 9
FIGURE 7 : ANATOMIE INTERNE DE LA VESSIE [28]. 11
FIGURE 8 : STRUCTURE DE LA VESSIE ET DE L'URÈTRE CHEZ LES DEUX SEXES [28]..... 12
FIGURE 9 : APPAREIL URINAIRE ET CALCUL RÉNAL 15
FIGURE 10 : SCHÉMA ILLUSTRANT LES FACTEURS INFLUENÇANT LA FORMATION DES CALCULS INFECTIEUX [69] . 20
FIGURE 11 : ANOMALIES ANATOMIQUES DE L'APPAREIL URINAIRE. 21
FIGURE 12 : MÉCANISME D'INITIATION DE FORMATION DES CALCULS RÉNAUX 25
FIGURE 13 : SCHÉMA ILLUSTRANT LES ÉTAPES DE LA FORMATION DES CALCULS. 26
FIGURE 14 : IMAGE DE LITHIASE CORALLIFORME [87] 36
FIGURE 15 : IMAGE DE LITHIASE DE BAS URETÈRE DROIT ET D'UNE LITHIASE DE VESSIE À L'ASP [87]..... 36
FIGURE 16 : IMAGE DE LITHIASE BLOQUÉE DANS L'URÈTRE POSTÉRIEUR À L'ASP [87]..... 37
FIGURE 17 : IMAGE DE LITHIASE URÉTÉRALE GAUCHE À LA PROJECTION DE L2 [87]..... 37
FIGURE 18 : SCHÉMA DU PRINCIPE DE LA RÉFLEXION INTERNE TOTALE EN MODE ATR 51
FIGURE 19 : ILLUSTRATION DU CHEMIN OPTIQUE TOTAL 51
FIGURE 20: BAS : SPECTRE DRIFTS DU SACCHAROSE (SUCRE DE TABLE). LA LIGNE EN POINTILLÉS MONTRE QUE LES PICS AUX NOMBRES D'ONDE ÉLEVÉS ET FAIBLES ONT À PEU PRÈS LA MÊME INTENSITÉ. 53
FIGURE 21 : SPECTRE ATR AVANT (EN BAS) ET APRÈS (EN HAUT) CORRECTION..... 53
FIGURE 22 : EMPLACEMENT TYPIQUE DES THERMOCOUPLES[131]..... 59
FIGURE 23 : TROIS EXEMPLES DE THERMOBALANCES COMMERCIALES, INCLUANT LE PLACEMENT TYPIQUE DES THERMOCOUPLES [131]..... 59
FIGURE 24 : ALLURES POSSIBLES D'UN THERMOGRAMME [131]..... 60
FIGURE 25 : DIFFÉRENTES ALLURES QUE PEUT PRENDRE UN THERMOGRAMME LORS DE LA FUSION (103). 61
FIGURE 26 : SCHÉMA D'UN CALORIMÈTRE DSC..... 64
FIGURE 27 : LES PHÉNOMÈNES THERMIQUES OBSERVÉS[131] 64
FIGURE 28 : ALLURE D'UN THERMOGRAMME [130]..... 64
FIGURE 29 : DÉSHYDRATATION ET FUSION D'UN SEL DIHYDRATÉ MISES EN ÉVIDENCE PAR DSC-ATG COUPLÉES [130]. 65
FIGURE 30 : PRÉSENTATION DES DONNÉES [175]..... 72
FIGURE 31 : CENTRAGE PAR LA MOYENNE SUIVI D'UNE RÉDUCTION DES VARIABLES..... 75
FIGURE 32: RÉPARTITION DES PATIENTS SELON LE SEXE ET LES TRANCHES D'ÂGE..... 98
FIGURE 33 : RÉPARTITION DES PATIENTS SELON L'INDICE DE MASSE CORPORELLE (IMC)..... 98
FIGURE 34 : RÉPARTITION SELON L'HISTORIQUE DES LITHIASES 98
FIGURE 35 : RÉPARTITION DES LOCALISATIONS LITHIASIQUES CHEZ LES 105 PATIENTS 99
FIGURE 36 : RÉPARTITION DES CAS SELON LES ANOMALIES MÉDICALES..... 99
FIGURE 37 : RÉPARTITION DES CAS SELON LES TRAITEMENTS MÉDICAMENTEUX 99
FIGURE 38 : RÉPARTITION DES CAS SELON LES ANOMALIES DES VOIES EXCRÉTRICES..... 100
FIGURE 39 : RÉPARTITION DES CAS SELON LA PRÉSENCE D'INFECTION 100
FIGURE 40 : RÉPARTITION DES CAS SELON LES BACTÉRIES IDENTIFIÉES 100
FIGURE 41: RÉPARTITION DES PRINCIPAUX TYPES DE LITHIASES URINAIRES..... 109
FIGURE 42 : RÉPARTITION HIÉRARCHIQUE DES TYPES LITHIASES URINAIRES ANALYSÉS..... 110
FIGURE 43 : MORPHOLOGIES DE L'OXALATE DE CALCIUM MONOHYDRATÉ (WHEWELLITE) DE SOUS-TYPE IA : A) SURFACE MAMELONNÉE DE COULEUR BRUN FONCÉ, B) SURFACE LISSE DE COULEUR BRUN FONCÉ, C) SURFACE LISSE DE COULEUR BRUN, « D » , « E » ET « F » : SECTIONS CONCENTRIQUES..... 112

FIGURE 44 : MORPHOLOGIES DE L'OXALATE DE CALCIUM MONOHYDRATÉ (WHEWELLITE) DE SOUS-TYPE IA : A) SURFACE MAMELONNÉE AVEC VOILE GRISÂTRE, B) SURFACE LISSE AVEC OMBILICATIONS, C) PLAQUE DE RANDAL 113
FIGURE 45: MORPHOLOGIES DE L'OXALATE DE CALCIUM MONOHYDRATÉ (WHEWELLITE) DE SOUS-TYPE IB 114
FIGURE 46 : MORPHOLOGIES DE L'OXALATE DE CALCIUM MONOHYDRATÉ (WHEWELLITE) DE SOUS-TYPE ID : SURFACE (EN HAUT) ; SECTION (EN BAT) 115
FIGURE 47: MORPHOLOGIES DE L'OXALATE DE CALCIUM MONOHYDRATÉ (WHEWELLITE) DE SOUS-TYPE ID : LA SURFACE (EN HAUT) ; LA SECTION : (EN BAS)..... 116
FIGURE 48 : MORPHOLOGIES DE L'OXALATE DE CALCIUM DIHYDRATÉ (WEDDELLITE) DE SOUS-TYPE **IIA (EN HAUT)** ET **IIB (EN BAS)** 117
FIGURE 49 : MORPHOLOGIES DE LA CONVERSION CRISTALLINE DE COD EN COM. 118
FIGURE 50 : MORPHOLOGIES DE L'ASSOCIATION DE COD ET COM : EN SURFACE (EN HAUT) ; EN SECTION (EN BAS) 118
FIGURE 51 : MORPHOLOGIES DE LA LITHIASE URIQUE ; A) IIIA ; B) IIIB 119
FIGURE 52 : MORPHOLOGIES DE L'ASSOCIATION ENTRE : LA SURFACE (EN HAUT) ; LA SECTION (EN BAS)..... 120
FIGURE 53 : MORPHOLOGIES DE L'ASSOCIATION ENTRE : A) EN SURFACE (IIIA +COM :; B) EN SURFACE (COM+IIIB: EN HAUT) ; EN SECTION (IIIA+COM :EN BAS) ; C) COM+IIID EN SECTION..... 121
FIGURE 54 : MORPHOLOGIES DE L'ASSOCIATION ENTRE : A) IVA1 B) IVA2..... 122
FIGURE 55 : MORPHOLOGIES DE BRUSHITE DE SOUS TYPE IVD 123
FIGURE 56 : MORPHOLOGIES DE L'ASSOCIATION ENTRE CARBAPATITE ET STRUVITE : A) B) : SURFACE IVA1 ; C) D) SECTION DE STRUVITE IVC 123
FIGURE 57 : MORPHOLOGIES DE L'ASSOCIATION ENTRE CARBAPATITE ET COM (IVA1+COM) : EN SURFACE (EN HAUT) ; EN SECTION (EN BAS 124
FIGURE 58 : MORPHOLOGIES DE L'ASSOCIATION ENTRE CARBAPATITE ET COD (IVA1+COD) : EN SURFACE (EN HAUT) ; EN SECTION (EN BAS). 124
FIGURE 59 : THERMOGRAMME DSC DU $CuSO_4 \cdot 5\ H_2O$ 133
FIGURE 60 : THERMOGRAMME ATG DU $CuSO_4 \cdot 5\ H_2O$ 134
FIGURE 67 : SUPERPOSITION DES SPECTRES FTIR DES ÉCHANTILLONS AVEC LES STANDARDS COM ET COD..... 140
FIGURE 68 : SUPERPOSITION DES THERMOGRAMMES DSC DES SOUS-TYPES COM AVEC LE STANDARD..... 141
FIGURE 69 : SUPERPOSITION DES THERMOGRAMMES DSC DES SOUS-TYPES COM AVEC LE STANDARD 141
FIGURE 70 : SUPERPOSITION DES SPECTRES FTIR REPRÉSENTATIFS DES SOUS-TYPES COD AVEC LE STANDARD. 142
FIGURE 71 : SUPERPOSITION DES THERMOGRAMMES TGA DES ÉCHANTILLONS DE SOUS-TYPES COD AVEC LE STANDARD 143
FIGURE 72 : SUPERPOSITION DES THERMOGRAMMES DSC DES ÉCHANTILLONS DE SOUS-TYPES COD AVEC LE STANDARD 144
FIGURE 73 : SUPERPOSITION DES SPECTRES FTIR ENREGISTRÉS SUR LES ZONES COM ET COD DES SURFACES AVEC LES STANDARDS RESPECTIFS..... 145
FIGURE 74 : SUPERPOSITION DES SPECTRES MOYENS FTIR ENREGISTRÉS EN SURFACES AVEC LES STANDARDS RESPECTIFS..... 146
FIGURE 75 : SUPERPOSITION DU SPECTRE DE L'ÉCHANTILLON AVEC LES MÉLANGES ARTIFICIELS COM+COD 60 :40 147
FIGURE 76 : SUPERPOSITION DU SPECTRE DE SECTION AVEC LES MÉLANGES ARTIFICIELS. 148
FIGURE 87 : SUPERPOSITION DES SPECTRES DES ÉCHANTILLONS AU_0 AVEC LE STANDARD AU_0..... 149
FIGURE 88 : SUPERPOSITION DES THERMOGRAMMES ATG DES ÉCHANTILLONS AU_0 AVEC LE STANDARD AU_0. .. 150
FIGURE 89 : SUPERPOSITION DES THERMOGRAMMES DSC DES ÉCHANTILLONS AU_0 AVEC LE STANDARD AU_0. .. 150
FIGURE 90 : SUPERPOSITION DES SPECTRES DES ÉCHANTILLONS AU_2 AVEC LE STANDARD AU_2. 151
FIGURE 91 : SUPERPOSITION DES THERMOGRAMMES ATG DES ÉCHANTILLONS AU2 AVEC LE STANDARD AU2.. 153
FIGURE 92 : SUPERPOSITION DES THERMOGRAMMES DSC DES ÉCHANTILLONS AU2 AVEC LE STANDARD AU2.. 153
FIGURE 93 : SUPERPOSITION DES SPECTRES DES ÉCHANTILLONS MIXTES DE LA FORME 1 AVEC LES MÉLANGES ARTIFICIELS $AU_0 + AU_2$..... 155

FIGURE 94 : SUPERPOSITION DES SPECTRES DES ÉCHANTILLONS MIXTES DE LA FORME 2 AVEC LES MÉLANGES ARTIFICIELS $AU_0 + AU_2$ 156
FIGURE 95 : SUPERPOSITION DES SPECTRES DES ÉCHANTILLONS MIXTES DE LA FORME 3 AVEC LES STANDARDS $AU_0 - AU_2$. 157
FIGURE 96 : SUPERPOSITION DES THERMOGRAMMES ATG DES ÉCHANTILLONS MIXTES DE LA FORME 1 AVEC LES MÉLANGES ARTIFICIELS AU0+AU2 158
FIGURE 97 : SUPERPOSITION DES THERMOGRAMMES DSC DES ÉCHANTILLONS MIXTES DE LA FORME 1 AVEC LES MÉLANGES ARTIFICIELS AU0+AU2 159
FIGURE 98 : SUPERPOSITION DES THERMOGRAMMES ATG DES ÉCHANTILLONS MIXTES DE LA FORME 2 AVEC LES MÉLANGES ARTIFICIELS AU0+AU2 160
FIGURE 99 : SUPERPOSITION DES THERMOGRAMMES DSC DES ÉCHANTILLONS MIXTES DE LA FORME 2 AVEC LES MÉLANGES ARTIFICIELS AU0+AU2 160
FIGURE 100 : SUPERPOSITION DES THERMOGRAMMES ATG DES ÉCHANTILLONS MIXTES DE LA FORME 3 AVEC LES MÉLANGES ARTIFICIELS AU0+AU2 161
FIGURE 101 : SUPERPOSITION DES THERMOGRAMMES DSC DES ÉCHANTILLONS MIXTES DE LA FORME 3 AVEC LES MÉLANGES ARTIFICIELS AU0+AU2 162
FIGURE 105 : SUPERPOSITION DES SPECTRES DES ÉCHANTILLONS MIXTES INTER-FAMILLE DE LA FORME 1 AVEC LE MÉLANGE ARTIFICIEL COM + AU0 50 :50. 163
FIGURE 106 : SUPERPOSITION DES SPECTRES DES ÉCHANTILLONS MIXTES INTER-FAMILLE DE LA FORME 2 AVEC LES STANDARDS COM ET AU0 164
FIGURE 107 : SUPERPOSITION DES SPECTRES DES ÉCHANTILLONS MIXTES INTER-FAMILLE AVEC LES STANDARD COM ET AU2 165
FIGURE 108 : SUPERPOSITION DES SPECTRES DES ÉCHANTILLONS MIXTES INTER-FAMILLE AVEC LE MÉLANGE COM+UR 90 :10 166
FIGURE 109 : SUPERPOSITION DES SPECTRES DES ÉCHANTILLONS MIXTES INTER-FAMILLE AVEC LES STANDARD COM ET UR 167
FIGURE 114 : SUPERPOSITION DES SPECTRES DE L'ÉCHANTILLON DE BRUSHITE AVEC LE STANDARD BRU 168
FIGURE 115 : SUPERPOSITION DES SPECTRES DES ÉCHANTILLONS MIXTES AVEC LES STANDARDS CARB- STR . 169
FIGURE 118 : SUPERPOSITION DE L'ÉCHANTILLON DE MÉLANGE CARB+COM DE LA FORME 1 AVEC LE MÉLANGE ARTIFICIEL CARB+COM 20:80 170
FIGURE 119: HEATMAP DES COEFFICIENTS PHI POUR LES ASSOCIATIONS BINAIRES PAR CATÉGORIE 238
FIGURE 120 : RÉSEAU CIRCULAIRE DES ASSOCIATIONS SIGNIFICATIVES ENTRE VARIABLES QUALITATIVES BINAIRES 239
FIGURE 121 : HEATMAP DES COEFFICIENTS V DE CRAMÉR POUR LES ASSOCIATIONS MODÉRÉES 244
FIGURE 122 : HEATMAP DES COEFFICIENTS V DE CRAMÉR POUR LES ASSOCIATIONS FORTES 248
FIGURE 123 : HEATMAP DES COEFFICIENTS V DE CRAMÉR POUR LES ASSOCIATIONS TRÈS FORTES 252
FIGURE 124 : BOXPLOT DE L'INDICE DE MASSE CORPORELLE (IMC) 257
FIGURE 125 : BOXPLOT DE L'EXCRÉTION URINAIRE DE PO4 (MG/24H) 257
FIGURE 126: BOXPLOT COMBINÉ DU PH URINAIRE ET DE LA GLYCOSURIE (SG G/L) 257
FIGURE 127 : HEATMAP DES COEFFICIENTS DE RÉGRESSION (B) 258
FIGURE 128 : CORRÉLATION LINÉAIRE ENTRE PHOSPHATE URINAIRE ET PH (B= 0.0010, R = 0,6039) 259
FIGURE 129 : CORRÉLATION LINÉAIRE ENTRE CALCIUM SANGUIN ET PTH (B= 0.4822, R = 0,5771) 260
FIGURE 130 : CORRÉLATION LINÉAIRE ENTRE L'IMC ET PH URINAIRE (B= - 0.0838 , R =- 0,555) 261
FIGURE 131 : CORRÉLATION LINÉAIRE ENTRE PHOSPHATE URINAIRE ET NA^+ URINAIRE (B= -0.0681, R = -0,4721) 262
FIGURE 132 : CORRÉLATION LINÉAIRE ENTRE LE PHOSPHATE URINAIRE ET GLYCÉMIE SANGUINE (B= -373.6357, R = 0,4014) 263
FIGURE 133 : CORRÉLATION LINÉAIRE ENTRE LA DIURÈSE ET PH (B= 0,9389, R = 0,4604) 264
FIGURE 134: CORRÉLATION LINÉAIRE ENTRE L'ÂGE ET ACIDE URIQUE SANGUIN (B = 0,4571, R= 0,3710) 265
FIGURE 135 : CORRÉLATION LINÉAIRE ENTRE L'IMC ET GLYCÉMIE SANGUINE 266

FIGURE 136 : CORRÉLATION LINÉAIRE ENTRE L'ACIDE URIQUE URINAIRE ET Na^+ URINAIRE (B = 0,2112, R = 0,3139)..... 267
FIGURE 137 : CORRÉLATION LINÉAIRE ENTRE PH ET GLYCÉMIE SANGUINE (B = -0,4084, R = -0,2386) 268
FIGURE 138: DISTRIBUTION DES VARIABLES QUANTITATIVES SELON L'HISTORIQUE DE LA LITHIASE ET DU BILAN PHOSPHOCALCIQUE URINAIRE 270
FIGURE 139 : DISTRIBUTION DES VARIABLES QUANTITATIVES SELON L'ANOMALIE MÉTABOLIQUE ET PARAMÈTRES MÉTABOLIQUES URINAIRES..... 271
FIGURE 140 : DISTRIBUTION DES VARIABLES QUANTITATIVES SELON L'INFECTION URINAIRE CONNUE ET PARAMÈTRES URINAIRES 273
FIGURE 141 : DISTRIBUTION DES VARIABLES SELON LA PRISE DE MÉDICAMENTS (BOÎTES À MOUSTACHES) 275
FIGURE 142 : DISTRIBUTION DE PO4 UR SELON LA LOCALISATION DU CALCUL (BOÎTES À MOUSTACHES) 277
FIGURE 143 : DISTRIBUTION DES DURETÉS SELON L'ÂGE ET L'IMC (ZONE 1)..... 279
FIGURE 144: DISTRIBUTION DES DURETÉS SELON LES VARIABLES BIOLOGIQUES (ZONE 1) 281
FIGURE 145 : INFLUENCE DES PARAMÈTRES BIOLOGIQUES « PHOSPHATE SANGUIN ET CALCIUM URINAIRE » SUR LA MORPHOLOGIE DE LA SURFACE (ZONE 2)..... 284
FIGURE 146 : INFLUENCE DES PARAMÈTRES SUR LA STRUCTURE DE LA COUCHE INTERNE (RUGUEUSE) 287
FIGURE 147 : INFLUENCE DES PARAMÈTRES SUR LA STRUCTURE DE LA COUCHE INTERNE (CRAYEUSE)..... 287
FIGURE 148 : FIGURE 148 : INFLUENCE DES PARAMÈTRES SUR LA STRUCTURE DE LA COUCHE INTERNE (COMPACTE) 288
FIGURE 149 : INFLUENCE DES PARAMÈTRES SUR LA POROSITÉ..... 291
FIGURE 150 : INFLUENCE DE L'ACIDE URIQUE SANGUIN SUR LA STRATIFICATION 291
FIGURE 151 : INFLUENCE DES PARAMÈTRES BIOLOGIQUES ET DÉMOGRAPHIQUES SUR LA DURETÉ DU NOYAU 293
FIGURE 152 : INFLUENCE DES PARAMÈTRES DÉMOGRAPHIQUES SUR LES CARACTÉRISTIQUES DU NOYAU 294
FIGURE 153 : HEATMAP SYNTHÉTIQUE DES ASSOCIATIONS..... 296
FIGURE 154 : COMPARAISON DES RMSE_SV PAR MODÈLE ET POUR CHAQUE COMPOSÉ 299
FIGURE 155 : DISTRIBUTION DES R^2_SV PAR MODÈLE POUR LA QUANTIFICATION DES LITHIASES URINAIRES 299
FIGURE 156 : COMPARAISON DES MAPE_SV POUR LES MEILLEURS MODÈLES..... 300
FIGURE 157 : HEATMAP DES R^2 MEILLEURS MODÈLES PAR COMPOSÉ 302
FIGURE 158 : DISTRIBUTION MOYENNE DES COMPOSÉS LITHIASIQUES PAR ZONE..... 304
FIGURE 159 : MATRICE DE CONFUSION (HEATMAP)..... 306
FIGURE 160 : DIAGRAMME ÉBOULIS ILLUSTRANT LE POURCENTAGE DE VARIANCE EXPLIQUÉE PAR LES DIX PREMIÈRES COMPOSANTES PRINCIPALES. LES TROIS PREMIÈRES CUMULENT 92,38 % DE LA VARIANCE TOTALE. 308
FIGURE 161 : REPRÉSENTATION DES ÉCHANTILLONS RÉELS DANS LE PLAN DES DEUX PREMIÈRES COMPOSANTES PRINCIPALES (PC1 VS PC2). 309
FIGURE 162 : REPRÉSENTATION DES ÉCHANTILLONS RÉELS DANS LE PLAN DES DEUX PREMIÈRES COMPOSANTES PRINCIPALES (PC1 VS PC3). 310
FIGURE 163: REPRÉSENTATION DES ÉCHANTILLONS RÉELS DANS LE PLAN DES DEUX PREMIÈRES COMPOSANTES PRINCIPALES (PC2 VS PC3). 311
FIGURE 164 : DISTRIBUTION DES SCORES PC1 SELON LA CLASSE CHIMIQUE. 312
FIGURE 165 : DISTRIBUTION DES SCORES PC1 SELON LA CLASSE CHIMIQUE. 313
FIGURE 166 : VARIATION DE LA COMPOSANTE PC3 SELON LES CLASSES CHIMIQUES. 314
FIGURE 167 : REPRÉSENTATION TRIDIMENSIONNELLE DES SCORES ACP (PC1, PC2, PC3) SELON LA CLASSE CHIMIQUE. 315
FIGURE 168 : MORTIER ET PILON EN AGATE. IV
FIGURE 169 : LOUPE BINOCULAIRE TYPE STEMI DRC ZEISS® 350 (LABORATOIRE DE CHIMIE ANALYTIQUE)..... IV
FIGURE 170 : PIED À COULISSE IV
FIGURE 171 : ACCESSOIRES ATR TYPE QUEST – SPERAC (PLATEFORME DE FACULTÉ DE MÉDECINE D'ANNABA) IV

FIGURE 172 : SPECTROMÈTRE INFRAROUGE A TRANSFORMÉ DE FOURIER TYPE IRAFFINITY-1S SHIMADZU® (PLATEFORME DE FACULTÉ DE MÉDECINE D'ANNABA) IV
FIGURE 173 : ANALYSEUR THERMIQUE SETARM LABSYS EVO -PLATE-FORME FACULTÉ DE MÉDECINE ANNABA- IV

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1: Fiche de renseignement clinique i
ANNEXE 2 : Liste des composés de référence utilisés pour l'analyse spectroscopique et thermique, avec leurs noms chimiques et fournisseurs iii
ANNEXE 3 : Matériels utilisés. iv
ANNEXE 4 : Données cliniques des patients. v
ANNEXE 5 : Habitudes alimentaires des patients. vii
ANNEXE 6 : Données biologiques des patients. ix
ANNEXE 7 : Typage morphologique des lithiases urinaires des patients. xi
ANNEXE 8 : Comparaison par paire des variables qualitative binaires xiii
ANNEXE 9 : Comparaison par paire des variables qualitatives nominales. xv
ANNEXE 10 : Comparaison par paire des variables quantitatives. xx
ANNEXE 11 : Etude des variables quantitatives en fonction des variables qualitatives binaires. xxi
ANNEXE 12 : Étude des variables quantitatives en fonction des variables qualitatives nominales. xxiii
ANNEXE 13 : Étude des variables qualitatives nominales en fonction des variables qualitatives binaires. xxv
ANNEXE 14 : Diagrammes de mosaïque illustrant les relations significatives entre variables qualitatives binaires et nominales dans les lithiases urinaires xxvi
ANNEXE 15 : Performances globales des modèles xxviii
ANNEXE 16 : Meilleurs modèles xxxi
ANNEXE 17 : Variables sélectionnées avec les meilleurs modèles pour chaque composé xxxiii
ANNEXE 18: Profils spectres avec variables sélectionnées avec les meilleurs modèles pour chaque composé xxxiv
ANNEXE 19 : Prédictions en utilisant les meilleurs modèles xxxv
ANNEXE 20 : Comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs enregistrées xxxvii
ANNEXE 21: Tableau des scores ACP moyens par classe (PC1–PC3) xli
ANNEXE 22 : Loadings (poids) des nombres d'onde sur PC1, PC2, PC3 xlii
ANNEXE 23 : Résumé des bandes spectrales contributives par classe et composante xliii

LISTE DES ABREVIATIONS

ACD : Analyse calorimétrique différentielle
ACP : Analyse en composantes principales
ADH :
AG : Algorithme génétique
AJG : Appareil juxta-glomérulaire

AmUr: Ammonium Urate

ANN : Artificial Neural Networks = Réseaux de neurones artificiels

ANOVA : Analysis of variance = Analyse de la variance

ASP : Abdomen sans préparation

ATD : Analyse Thermique Différentielle

ATG : analyse thermogravimétrique

ATR: Attenuated Total Réflexion = Refléxion totale attenuée

AU0 : Acide urique anhydre

AU2 : Acide urique dihydraté

AUM : Acide urique monohydraté

BRUSH : Brushite

CaCO3 : Carbonate de calcium

CAH : Classification ascendante hiérarchique

CARB: Carbapatite

CART : Classification And Regression Trees = Arbres de régression et de classification

CCSM : Méthode du centre constant

CDB : Calorimétrie Différentielle à Balayage

CHU : Centre Hospitalier Universitaire

CM : Carrés moyens

CNA : Colique néphrétique aiguë

COD : Oxalate de calcium dihydraté

COM : Oxalate de calcium monohydraté

COT : Oxalate de calcium trihydraté

CovSel : Covariate Selection

CP : Composante principale

CV : Coefficient de variation

CURI : Centre universitaire régional d'interface

CAR : Carbapatite

DP : Profondeur de pénétration

DRIFTS: Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform Spectroscopy = Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier en réflexion diffuse

DSC : Calorimétrie différentielle à balayage

ERI : Élément de réflexion interne

FTIR : Spectrophotométrie infrarouge à transformée de Fourier

IMC : Indice de Masse Corporelle

IRC : Insuffisance rénale chronique

KBr : Bromure de potassium

LASSO : Least absolute selection and shrinkage operator

LED : Light Emitting Diode= diode électroluminescente

MCO : Moindres carrés ordinaires

MCR : Méthode de centrage moyen des spectres des rapports d'absorbances

MLRA : Analyse de régression linéaire multi-longueur d'onde

MIR : Mid-Infrared **=** Infrarouge moyen

NIPALS : Non-linear Iterative Partial Least Squares

NIR : Near Infrared = infrarouge proche

PCR : Principal Component Regression = Régression sur composantes principales

Ph.JP : Pharmacopée japonaise

PLS : Partial Least Squares ou Projection to Latent Structures = Régression des moindres carrés partiels

PMC : Perceptron multicouches

OxCa : Oxalate de calcium

PACC : Phosphate amorphe de calcium carbonaté.

PCa : Phosphate de calcium

PCC : Phosphate de calcium carbonaté

PF : Produit de formation

R^2 : coefficient de détermination

RBF : Radial Basis Function = fonction de base radiale

RMSECV : Root Mean Square Error Cross Validation = Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne de la validation croisée

RMSEP : Root Mean Square Error Prediction = Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne de la prédiction

RMSEV : Root Mean Square Error Validation = Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne de la validation

SCM : Somme des carrés expliqués par le modèle

SG : Savitzky-Golay

SIMCA : Soft Independent Modeling of Class Analogies = modélisation indépendante de sous-espaces locaux

SJP : Syndromes de jonction pyélo-urétérale

SMLR : Stepwise multilinear regression = Régression linéaire multiple pas à pas

SPIR : Spectroscopie infrarouge

STO-NG : Slayer Type Orbitals

STR : Struvite

SV : Split-Valence

SVM : Support Vector Machines SVM

SVR : Support Vector Regression = régression par vecteurs de support

TCP : Tube Contourné Proximal

TCD : Tube Contourné Distal

TC : Tube Collecteur

t-SNE : t-distributed Stochastic Neighbor Embedding= Incrustation stochastique des voisins en t-distribution

INTRODUCTION

Les lithiases urinaires, communément appelées calculs rénaux ou calculs urinaires, représentent aujourd'hui un problème de santé publique en constante augmentation à l'échelle mondiale [1–4] Touchant 4 à 20 % de la population mondiale selon les régions [5], avec un taux de récidive avoisinant 60 % [6–8] .

Leur incidence, en hausse dans les pays industrialisés, est liée à des facteurs alimentaires, métaboliques (obésité, diabète), environnementaux et génétiques [2,9,10], positionnant cette pathologie aux côtés des maladies cardiovasculaires ainsi que l'hypertension, dont elle pourrait être un marqueur [11].

Ces petites concrétions solides, qui se forment au sein du système urinaire (reins, uretères, vessie), résultent d'un déséquilibre entre les substances dissoutes dans l'urine [12] .

La diversité des lithiases est remarquable, tant par leur composition chimique que par leur structure morphologique, (oxalate de calcium, acide urique, struvite, etc.) [13,14].

Bien que cette pathologie représente un enjeu majeur de santé publique, sa prise en charge médicale est fréquemment sous-estimée, souvent perçue comme un épisode aigu se résolvant spontanément sans séquelles durables. Cependant, chez les patients présentant un risque de récidive, l'absence d'identification précise de la cause sous-jacente peut entraîner une progression vers une insuffisance rénale [15,16].

Dans une optique de prise en charge optimale, il est essentiel d'analyser le calcul (fragments) afin d'en déterminer la composition et la structure. Cette démarche contribue à identifier la pathologie sous-jacente, permettant ainsi de personnaliser le traitement et de réduire le risque de récidive.

Cette approche repose principalement sur le lien existant entre les caractéristiques physico-chimiques du calcul et la pathologie en cause. Elle nécessite une investigation étiologique approfondie, incluant une analyse morpho-constitutionnelle « notamment par spectroscopie infrarouge » ainsi qu'un bilan biologique guidé par les données cliniques, radiologiques et physiques du patient [17–19]

Actuellement, la méthode de référence pour analyser ces calculs est la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier IRTF, souvent complétée par d'autres techniques comme la diffraction des rayons X ou l'analyse thermique différentielle [20–22] Ces méthodes permettent d'identifier avec une grande précision les phases cristallines présentes dans un calcul. Cependant, elles présentent certaines limites, notamment lorsque les calculs sont mixtes (composés de plusieurs

substances), zonés (comportant des couches successives de compositions différentes) ou altérés (déformés par des traitements ou manipulations). Dans ces cas, la superposition des bandes spectrales complique l'interprétation, pouvant conduire à des erreurs diagnostique, ou nécessitant des analyses complémentaires coûteuses [13,18]

Face à ces défis, un nouveau champ d'analyse s'impose « la chimiométrie » regroupant un ensemble de méthodes statistiques et mathématiques, elle offre une solution prometteuse en facilitant l'analyse des spectres infrarouges. Elle permet d'extraire des informations pertinentes, de classer les échantillons, de révéler des relations cachées et de prédire des variables d'intérêt [23].

La chimiométrie pourrait non seulement de mieux discriminer les types et les constituants des calculs, mais aussi de mettre en évidence des liens entre la composition des lithiases et les pathologies sous-jacentes [24].

Ce travail vise principalement à évaluer l'efficacité de l'association de la spectroscopie infrarouge (IRTF) et la chimiométrie pour identifier avec précision les constituants des lithiases urinaires et mieux comprendre les mécanismes de leur formation.

Il cherche à développer des modèles chimiométriques pour améliorer la précision de l'identification des calculs, en particulier dans les cas complexes, et à établir des liens entre leur composition et les profils pathologiques des patients. À travers une approche intégrée, combinant caractérisation morphologique, analyse spectrale et outils chimiométriques,

Plusieurs objectifs secondaires guident cette démarche :

1. **Caractériser la structure morphologique des calculs** (par coupe manuelle et observation macroscopique), afin d'identifier les couches, les zones de croissance et les hétérogénéités éventuelles;
2. **Réaliser une analyse spectroscopique et thermique** (IRTF et DSC) de tous les échantillons étudiés;
3. **Appliquer des outils chimiométriques**, incluant à la fois des méthodes exploratoires (comme l'analyse en composantes principales) et des méthodes quantitatives de régression (telles que la régression PLS ou la régression logistique), afin d'explorer les relations entre les données analytiques et les types de lithiases ;

4. **Établir des corrélations entre la composition des calculs et les profils pathologiques des patients**, en particulier dans les cas où le lien étiologique est ambigu ou plurifactoriel.

L'originalité de ce travail réside dans l'intégration systématique de la chimiométrie aux données spectroscopiques, ce qui pourrait permettre une analyse plus approfondie des calculs urinaires complexes et ouvrir la voie à un diagnostic plus rapide, plus accessible et mieux adapté aux exigences de la médecine personnalisée.

Ce travail s'articule en deux parties principales : une première partie consacrée à une revue de la littérature sur les lithiases urinaires et les principales techniques d'analyse, suivie d'une seconde partie expérimentale présentant le matériel, la méthodologie employée ainsi que les résultats obtenus.

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I

LITHIASE URINAIRE

1 Anatomie et physiologie de l'appareil urinaire

1.1 Anatomie de l'appareil urinaire

Le système urinaire comprend deux reins, deux uretères, la vessie et l'urètre. Il assure l'élimination des déchets par la formation d'urine [25].

La fonction principale du système urinaire est d'éliminer les substances du sang, de former l'urine et d'aider à réguler divers processus métaboliques, y compris l'eau, les ions, le pH et la pression artérielle [25–27] .

Chaque rein filtre le sang pour éliminer l'eau, les ions en excès, les déchets métaboliques comme l'urée, ainsi que des substances toxiques [25,27–29].

Le tractus urinaire est le système de plomberie du corps qui fonctionne pour drainer l'urine produite par les reins, la stocker et ensuite la libérer pendant les mictions [27–29].

1.1.1 Anatomie des reins

1.1.1.a Anatomie externe

Les reins sont situés dans le rétropéritoine, de part et d'autre de la colonne vertébrale (T11–L3). Le rein droit est légèrement plus bas que le gauche en raison de la présence du foie[30,31] (**Fig 1**).

Chez l'adulte, chaque rein mesure environ 11 cm sur 6 cm et pèse environ 140 g [30].

Les reins, situés dans la partie supérieure des voies urinaires, produisent l'urine qui est acheminée à la vessie par les uretères [30,32].

Chaque rein est entouré d'une capsule fibreuse, de graisse périrénale, du fascia rénal (ou fascia de Gerota) et de graisse pararénale [30,31] (**Fig 2**).

Anatomiquement, un rein présente deux faces, deux pôles et deux bords [31] .

1.1.1.b Anatomie interne et structure microscopique du rein

Une coupe frontale d'un rein **(Fig. 3)** révèle [25] :

- **Cortex :** Situé en périphérie, contient les corpuscules rénaux (glomérule + capsule de Bowman) et les tubules contournés[30] ;
- **Médulla** : forme la partie interne du rein, est formée de 8 à 12 pyramides rénales abritant les anses de Henle et les tubules collecteurs, qui débouchent dans les calices mineurs via les papilles rénales [30] ;
- **Calyces :** mineurs puis majeurs, recueillent l'urine et la dirigent vers le bassinet ou pelvis rénal, qui se prolonge par l'uretère [30,31]

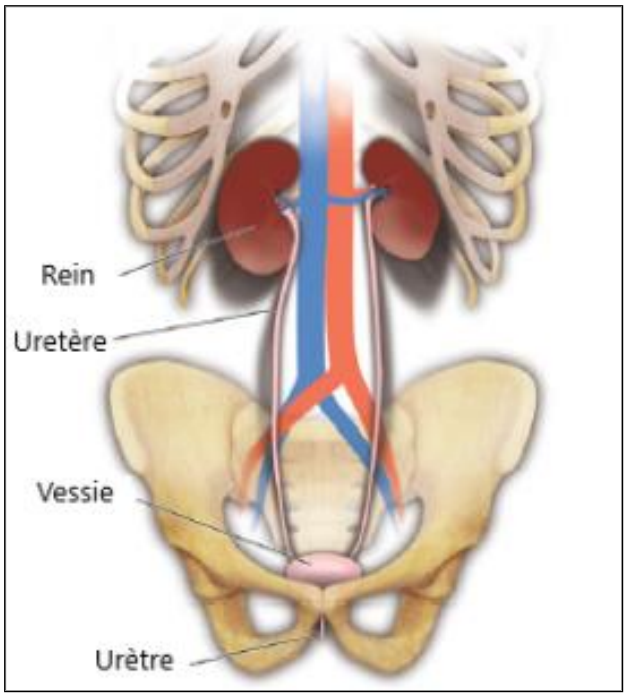


Figure 1 : Position du système urinaire au voisinage des autres organes . [31]

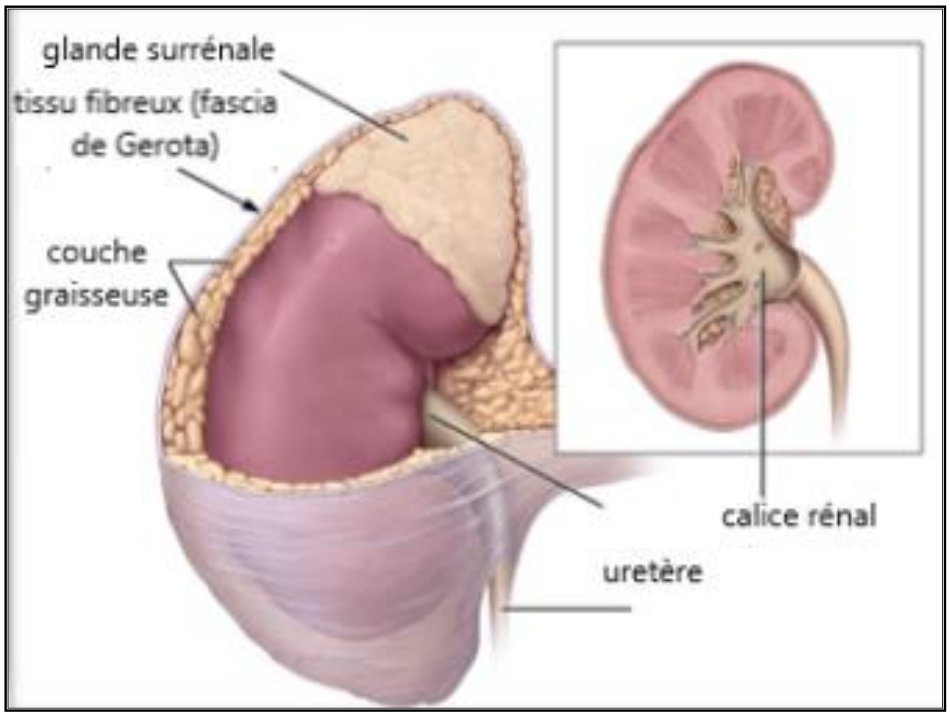


Figure 2: Structure externe du rein [33]

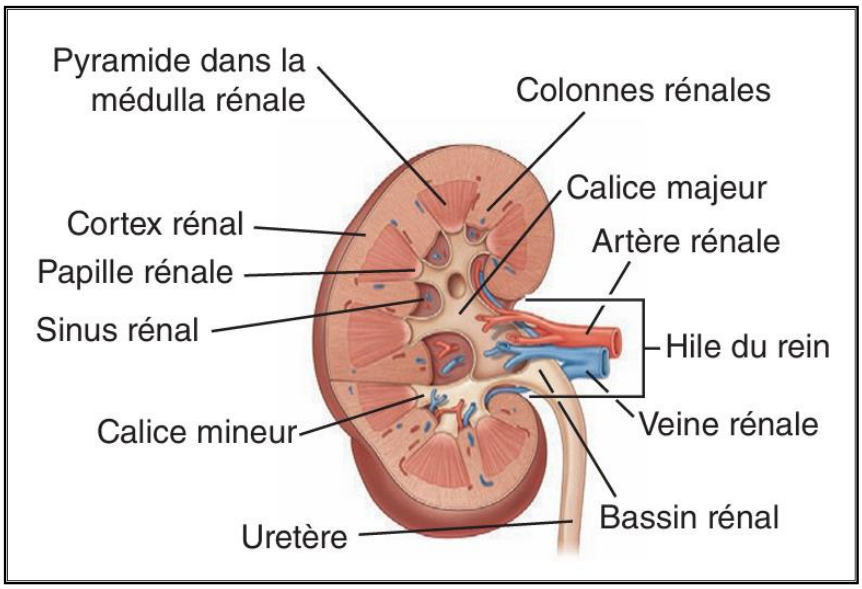


Figure 3 : Schéma d'anatomie interne du rein [30] .

1.1.2 Anatomie structurelle d'un néphron

Le parenchyme rénal, ou tissu fonctionnel du rein, est composé de milliers de néphrons, unités de base de la filtration [25,27,28] **(Fig. 4)**.

Chaque néphron comprend un glomérule (réseau capillaire issu de l'artériole afférente) entouré de la capsule de Bowman, formant le corpuscule rénal. L'artériole efférente draine le glomérule et irrigue les tubules rénaux [25,27,28].

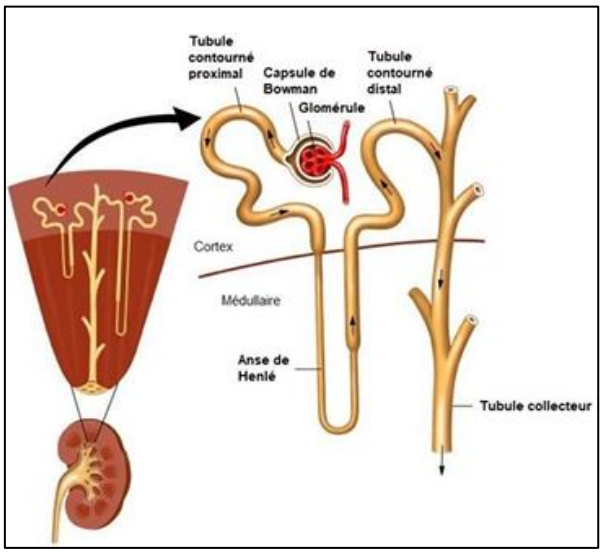


Figure 4 ; Anatomie structurale du néphron [34]

Après la capsule de Bowman, l'urine passe successivement par : le tubule contourné proximal, l'anse de Henlé (descendante et ascendante, fine et épaisse), le tubule contourné distal, puis le tubule collecteur, le canal papillaire, les calices, le pelvis rénal, et enfin l'uretère [25,27–29].

Les tubules, bien que débutant dans le cortex, plongent dans la médulla, effectuent une boucle, puis remontent vers le cortex près de leur glomérule d'origine [25,27–29].

1.1.2.a Anatomie et fonction du corpuscule rénal et des tubules constituant le néphron

- **Corpuscule rénal de Malpighi**

Le corpuscule rénal, premier segment du néphron [27] , est une structure sphérique formée de la capsule de Bowman, une couche de cellules épithéliales entourant un amas de capillaires appelé glomérule (fig. 5). Il est rempli de vaisseaux sanguins [25,27]

La filtration passive s'effectue à travers trois couches : l'endothélium capillaire, la membrane basale glomérulaire et les podocytes, qui forment une barrière sélective[27].

Le filtrat ainsi produit, appelé urine primitive, contient de l'eau, du glucose, des acides aminés, des ions (Na^+, Cl^-, HCO_3^-, K^+), de l'acide urique et de la créatinine, mais exclut les protéines plasmatiques et les cellules sanguines [25,27]

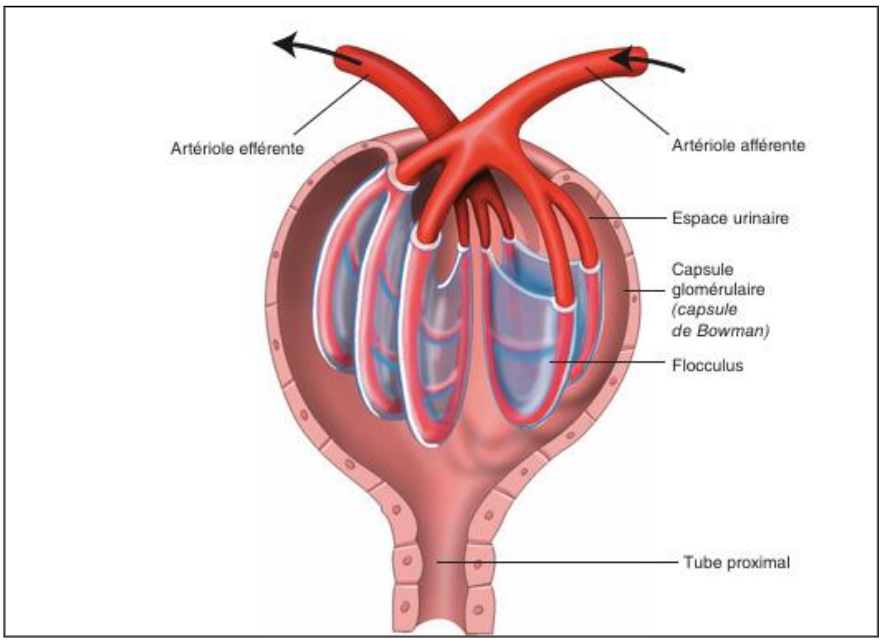


Figure 5 : Structure du corpuscule rénal de Malpighi. [35]

- **Tubule contourné proximal**

Le tubule contourné proximal, premier segment tubulaire du néphron, prolonge l'espace urinaire de Bowman au pôle tubulaire du corpuscule rénal [27,36,37].

Sa fonction principale est la réabsorption active de la majorité des nutriments organiques (glucose, acides aminés, polypeptides), des électrolytes (notamment le Na^+), des protéines plasmatiques, des vitamines et de 60 à 65 % de l'eau vers les capillaires péritubulaires, permettant leur retour dans la circulation sanguine [27,36,37].

Il participe également à la sécrétion de certains ions comme H^+ et NH_4^+ dans le filtrat urinaire [37].

- **Anse de Henlé**

L'anse de Henlé est une structure en forme de U**,** composée d'une branche descendante grêle (15 µm, épithélium aplati) et d'une branche ascendante large (30 µm, épithélium cubique pauvre en organites) [27–29].

La branche descendante est perméable à l'eau mais imperméable aux électrolytes, tandis que la branche ascendante est perméable aux électrolytes mais imperméable à l'eau.

Cette organisation permet la réabsorption des électrolytes sans eau, ce qui dilue le filtrat dans la portion ascendante, bien que cette réabsorption y soit limitée [27–29].

- **Tube contourné distal (TCD)**

Le tubule contourné distal et le canal collecteur constituent le néphron terminal.

Le tubule contourné distal est la dernière partie du néphron, se poursuivant dans les canaux collecteurs. Il sécrète des ions (H^+, K^+, NH_3) et réabsorbe le bicarbonate (HCO_3^-), contribuant à l'équilibre acido-basique. Il permet aussi une réabsorption conditionnelle du sodium et de l'eau, régulant ainsi le pH et l'équilibre sodium-potassium sanguin [25,28,29].

Le canal collecteur, tube droit collectant le filtrat de plusieurs néphrons, assure la sécrétion d'ions H^+ et K^+ et permet la réabsorption maximale d'eau, conduisant à la production d'une urine concentrée [25,28,29].

- **Tube collecteur**

Les tubes collecteurs naissent dans le cortex et traversent la médullaire pour former les tubes de Bellini. Leur paroi est constituée de cellules cubiques à cytoplasme clair, dont la hauteur augmente avec le diamètre du tube [25,28,29].

Sous l'action de l'ADH, ces tubes assurent la réabsorption de l'eau, jouant un rôle central dans la concentration finale de l'urine. Ils participent également à la réabsorption du sodium (Na^+) (stimulée par l'aldostérone), des bicarbonates (HCO_3^-), du chlorure (Cl^-) et de l'urée, tout en sécrétant des ions potassium (K^+) et hydrogène (H^+) pour maintenir l'équilibre électrolytique et acido-basique [25,28,29]. **(fig. 6) .**

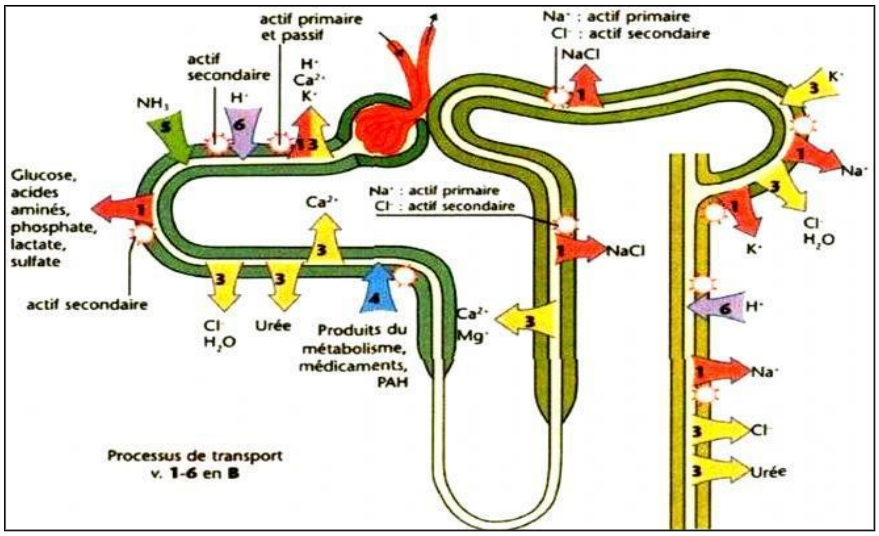


Figure 6 : Localisation des principaux processus de transport dans les tubules de néphro [38]

1.1.2.b Anatomie des voies urinaires excrétrices

Les voies urinaires sont constituées par l'ensemble des conduits que l'urine traverse depuis les reins jusqu'au milieu extérieur ; elle comprend : les calices, le bassinet, l'uretère, la vessie et l'urètre.

- **Calices**

Ce sont des tubes creux, de deux types :

a. Les petits calices (les calices mineurs)

Les calices mineurs sont de courts conduits (1 à 2 cm) qui entourent les papilles rénales, formant des cavités convexes vers l'extérieur. Chaque papille est généralement associée à un calice mineur, totalisant entre huit et dix calices par rein [32] .

Ces structures, fixées aux aires criblées par un anneau fibreux circulaire nommé fornix, peuvent être simples ou composés (résultant de la fusion de plusieurs calices simples autour d'une papille composée) [32] .

Situés autour des pyramides de Malpighi, ils en recouvrent le sommet et recueillent l'urine excrétée, avant de converger pour former des calices majeurs [32] .

b. **Grands calices (Les calices majeurs)**

Les calices majeurs se forment par la fusion de 2 à 4 calices mineurs. Leur nombre varie entre 2 et 5, disposés selon le plan frontal du rein [30–32,39].

Dans 65 % des cas, on observe deux calices majeurs (supérieur et inférieur), tandis que 32 % des reins en présentent trois (supérieur, moyen, inférieur) [30–32,39].

Tous convergent vers le pelvis rénal, mais leur orientation diffère :

- Le calice majeur supérieur, long et étroit, s'oriente vers le pôle supérieur dans l'axe de l'uretère;
- Le calice majeur inférieur, plus court et plus large, descend vers le pôle inférieur, formant un angle d'environ 60° avec l'axe urétéral;
- En cas de présence d'un calice majeur moyen, celui-ci se draine directement dans le pelvis avec un angle proche de 90° [30–32,39].

- **Pelvis rénal (Bassinet)**

Le pelvis rénal résulte de l'union des grands calices et constitue, pour chaque rein, un réservoir qui collecte l'urine produite avant de la diriger vers l'uretère. Il présente une forme triangulaire, aplatie d'avant en arrière, et possède les caractéristiques suivantes :

- Deux faces, une antérieure et une postérieure ;
- Un bord médial presque vertical ;
- Un bord inférieur horizontal et concave ;
- Un sommet inférieur, situé à l'endroit de l'abouchement de l'uretère, formant la jonction pyélo-urétérale ;
- Une base, qui reçoit les calices majeurs dans le sinus rénal.

Le pelvis rénal est un organe contractile, ce qui facilite la progression de l'urine à travers les voies urinaires [30–32,40].

- **Uretère**

Les uretères sont deux conduits fibromusculaires bilatéraux mesurant entre 22 et 30 cm de long **(fig. 8)**, assurant le transport de l'urine depuis le pelvis rénal jusqu'à la vessie. Ils prennent naissance à la jonction uretéro-pelvienne située en arrière des vaisseaux rénaux, puis suivent un trajet rétropéritonéal le long de la face antérieure du muscle psoas. Lorsqu'ils pénètrent dans la cavité pelvienne, les uretères s'orientent médialement en croisant la bifurcation de l'artère iliaque commune. À l'approche de la vessie, ils traversent sa paroi de manière oblique sur une

distance de 1,5 à 2 cm, formant ainsi la jonction uretéro-vésicale. Ce trajet intramural oblique constitue un mécanisme anatomique essentiel à la prévention du reflux vésico-urétéral urétéraux [30–32].

- **Vessie**

La vessie est un organe pelvien creux, distensible, de forme tétraédrique à vide et ovoïde lorsqu'elle est remplie. Constituée majoritairement de muscle lisse et de collagène, elle contient peu d'élastine. Sa partie supérieure est reliée à la paroi abdominale antérieure par l'ouraque, vestige embryonnaire fixé à l'apex vésical **(fig. 7)**.

Chez l'homme, elle est située entre le rectum et la symphyse pubienne, tandis que chez la femme, elle se trouve entre le rectum et l'utérus ou le vagin. Entourée de tissu conjonctif et de graisse dans ses régions antéro-inférieure et latérales, la vessie présente à sa base le trigone vésical, zone triangulaire comprise entre les deux orifices urétéraux et le méat urétral interne. Sa paroi musculaire est formée de trois couches de muscle lisse, organisées en une couche circulaire interne encadrée par deux couches longitudinales, constituant le muscle détrusor, tandis que sa lumière interne est tapissée par un épithélium transitionnel appelé urothélium [30–32].

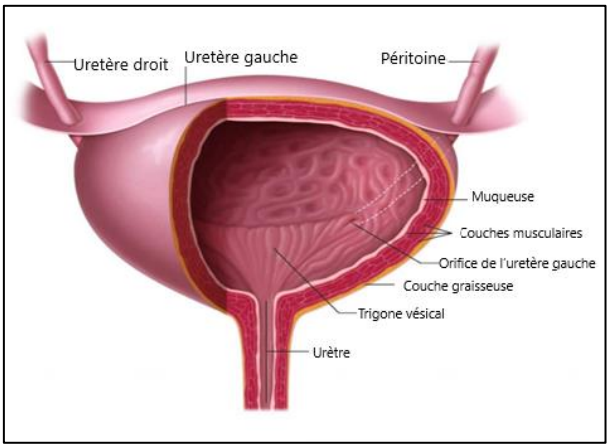


Figure 7 : Anatomie interne de la vessie [28].

- **Urètre**

L'urètre est un conduit musculaire lisse qui assure la sortie de l'urine depuis la vessie. À son extrémité proximale, il est entouré du sphincter urétral interne, un anneau de muscle lisse situé au col de la vessie. À son extrémité distale, il traverse les muscles striés du plancher pelvien, formant le sphincter urétral externe [30–32].

Chez la femme, le méat urétral s'ouvre dans le vestibule du vagin, et l'urètre a uniquement une fonction urinaire. Chez l'homme, le méat urétral se situe au bout du gland du pénis, et l'urètre joue un double rôle, servant à la fois au passage de l'urine et du liquide séminal [30–32].

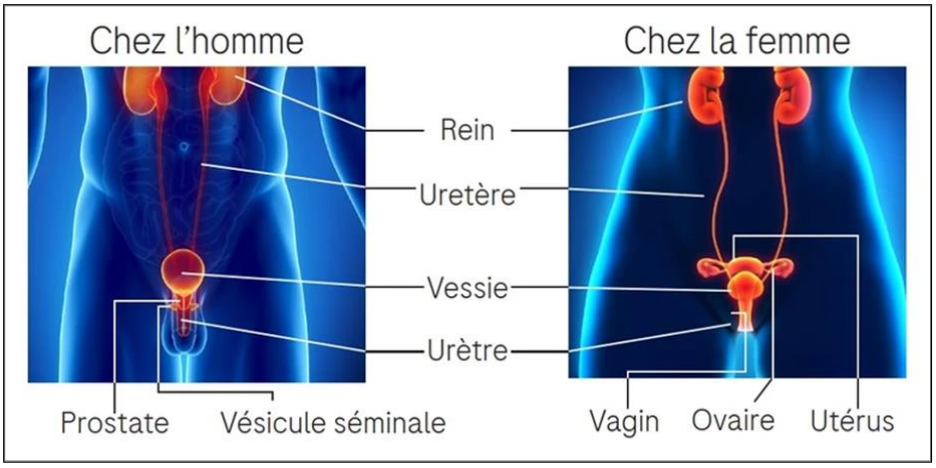


Figure 8 : Structure de la vessie et de l'urètre chez les deux sexes [28].

1.2 Physiologie urinaire et rôle du rein dans l'homéostasie

Les reins assurent le maintien de l'homéostasie en régulant l'équilibre hydrique et osmotique, la concentration des électrolytes (Na^+, K^+, Ca^{2+}, etc.), le volume plasmatique et la pression artérielle. Ils contrôlent également l'équilibre acido-basique, excrètent les déchets métaboliques (urée, acide urique, créatinine) et les substances étrangères (médicaments, toxines). De plus, ils sécrètent l'érythropoïétine (stimulant la production de globules rouges), la rénine (impliquée dans la régulation du sel et de la pression artérielle) et activent la vitamine D [25,27,37].

1.2.1 Physiologie des tubules du néphron

Chaque rein comprend entre 400 000 et 1 million de néphrons, unités fonctionnelles acquises avant la naissance. Chaque néphron est formé d'un glomérule et d'un tubule. Les reins, hautement vascularisés, reçoivent 20 à 25 % du débit cardiaque, dont 90 % sont dirigés vers les glomérules [25,27–29].

1.2.1.a Filtration glomérulaire

Dans le glomérule, le sang est filtré sous pression par un processus appelé ultrafiltration, grâce à la dilatation de l'artériole afférente et à la contraction de l'artériole efférente, créant un gradient de pression [25,27–29].

Cette filtration produit 130 à 180 L d'urine primitive par jour, nécessitant une réabsorption massive d'eau et d'électrolytes pour ajuster la composition finale de l'urine et maintenir l'équilibre hydroélectrolytique de l'organisme [25,27].

1.2.1.b Réabsorption tubulaire

Le tube proximal assure une réabsorption iso-osmotique de la majorité des solutés filtrés : environ 70 % de l'eau, du sodium, du potassium et du phosphate, 80 % des bicarbonates, et 100

% du glucose et des acides aminés. Il intervient également dans la sécrétion des ions H^+ et de l'ammoniaque, son principal tampon urinaire [25,27,29].

1.2.1.c Sécrétion

Des substances toxiques comme les ions H^+, K^+, certains médicaments, poisons et toxines métaboliques sont sécrétées depuis les capillaires vers les tubules rénaux pour être éliminées dans l'urine.

1.2.1.d L'excrétion

L'élimination de l'urine correspond à l'étape finale des processus rénaux. À la fin du néphron, seules les substances inutiles ou toxiques restent, tandis que le glucose, les acides aminés et les métabolites utiles ont été réabsorbés. L'excrétion d'une substance est déterminée par la formule : Excrétion = Filtration – Réabsorption + Sécrétion [25,27,29].

1.2.1.e Équilibre acido-basique et métabolisme des minéraux

Le maintien de l'équilibre acido-basique est essentiel au bon fonctionnement de l'organisme. Le pH sanguin est régulé dans une plage étroite (7,35–7,45) grâce à des systèmes tampons, notamment le couple bicarbonate/acide carbonique, et à l'action des reins qui ajustent l'excrétion des ions H^+ et la réabsorption des bicarbonates [36,41,42].

Des déséquilibres acido-basiques peuvent influencer le métabolisme des minéraux et favoriser la formation de calculs rénaux. Par exemple, une acidose chronique peut réduire l'excrétion de citrate, un inhibiteur naturel de la cristallisation des sels de calcium, augmentant ainsi le risque de lithiases calciques. À l'inverse, une urine trop alcaline (pH > 7,5) peut favoriser la précipitation de phosphates calciques [41]

Les apports alimentaires jouent également un rôle. Une alimentation riche en protéines animales peut acidifier l'urine, tandis qu'une consommation accrue de fruits et légumes, sources de potassium et de bicarbonates, peut l'alcaliniser. De plus, un régime alcalin peut augmenter l'excrétion de citrate, contribuant à la prévention des calculs [43,44].

1.2.2 Physiologie des voies urinaires basses

La miction est déclenchée lorsque le cerveau envoie des signaux pour relâcher les sphincters et contracter la vessie, permettant l'expulsion de l'urine. La fréquence urinaire dépend de la production rénale d'urine et de la capacité de la vessie. Pendant le remplissage, la vessie reste détendue tandis que les sphincters demeurent contractés pour retenir l'urine [25].

1.2.2.a Miction et caractéristiques de l'urine

La miction est le processus d'émission de l'urine. La distension de la vessie envoie des signaux sensoriels qui déclenchent des influx parasympathiques, stimulant la contraction du muscle détrusor et le relâchement du sphincter urétral interne. Le relâchement volontaire du sphincter urétral externe permet l'émission de l'urine [40]

1.2.3 Pathologies de l'appareil urinaire

Le processus éliminatoire ne s'arrête pas à la formation de l'urine. Des changements structurels dans les voies urinaires inférieures, des infections ou des troubles neurologiques peuvent perturber la vidange de la vessie. Ces perturbations, fréquentes pendant la grossesse et chez les personnes âgées, peuvent entraîner douleur, détresse et dommages progressifs aux reins, en interférant avec l'évacuation de l'urine ou en permettant l'infection des reins [45].

1.2.3.a Maladies principales du rein

On distingue ces principaux atteints au niveau rénal

a. **La glomérulonéphrite** : c'est une inflammation des glomérules, souvent causée par une réaction allergique aux toxines des streptocoques, entraînant l'infiltration de sang dans l'urine (hématurie) et des protéines. Cela peut causer une insuffisance rénale chronique [27].
b. Le **syndrome néphrotique** : il est marqué par une protéinurie élevée et une hyperlipidémie dues à une perméabilité accrue de la membrane de filtration, permettant le passage de protéines comme l'albumine dans l'urine. Ce syndrome est lié à des maladies glomérulaires et des troubles systémiques comme le diabète et le lupus [27].
c. L'**insuffisance rénale** se manifeste par une diminution ou un arrêt de la filtration glomérulaire, avec deux formes [46] :
   - **Aiguë** : Arrêt soudain de la fonction rénale, souvent dû à une baisse du volume sanguin, des lésions rénales ou des médicaments;
   - **Chronique** : Dégénérescence progressive de la fonction rénale, nécessitant une dialyse ou une greffe à l'étape terminale.
d. **Les anomalies congénitales des reins** : incluent les reins ectopiques (situés anormalement bas) et les reins polykystiques, une maladie héréditaire [47].
e. **Les tumeurs rénales** sont rares, mais incluent des formes malignes comme le carcinome de Grawitz, un cancer de l'épithélium tubulaire chez les hommes âgés, et la tumeur de Wilms, affectant généralement les enfants [30].

1.2.3.b Maladies des voies excréto- urinaires

Les principales affections des voies urinaires incluent :

a. **Les infections urinaires :** souvent causées par des bactéries comme *E. coli* et *Proteus*, sont plus fréquentes chez les femmes et peuvent entraîner des complications graves comme la pyélonéphrite [45].
b. **Les obstructions des voies urinaires :** dues à des calculs, tumeurs ou anomalies, peuvent provoquer une dilatation des voies et mener à une insuffisance rénale [28].
c. **Les tumeurs des voies urinaires :** souvent bénignes mais parfois malignes, proviennent de l'épithélium de transition et sont plus fréquentes chez les hommes, généralement en raison de facteurs environnementaux [40]
d. **La lithiase urinaire** : résulte de la formation de calculs dans les reins et la vessie, ce qui peut obstruer le flux urinaire et causer une insuffisance rénale [48].

2 Lithiase urinaire

2.1 Définition de la lithiase urinaire :

La lithiase urinaire est une maladie liée à un déséquilibre biochimique de l'urine [36], entraînant la formation de calculs minéraux ou organiques dans les reins ou les voies urinaires [49] **(fig 9).** Ces calculs peuvent migrer vers la vessie en traversant l'uretère, un canal étroit, et provoquer une obstruction douloureuse (colique néphrétique) lorsqu'ils mesurent 5 mm ou plus [50].

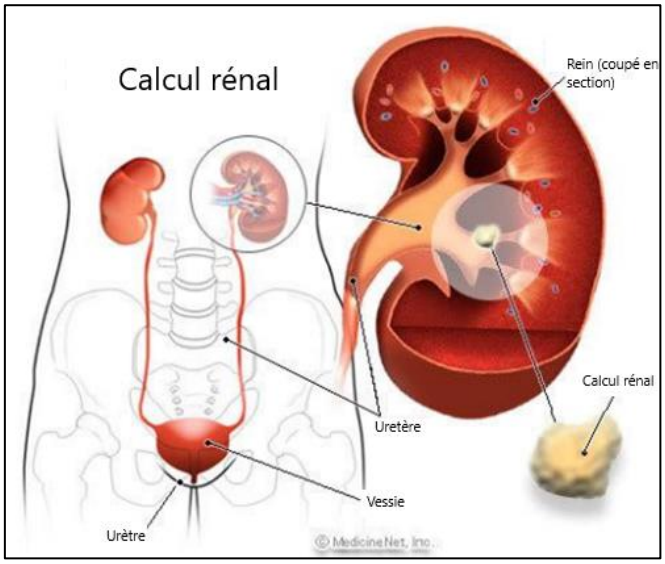


Figure 9 : Appareil urinaire et calcul rénal [51]

2.2 Aperçu historique sur la lithiase urinaire

La lithiase urinaire est une maladie ancienne, attestée dès l'Antiquité, avec la découverte d'un calcul chez un adolescent en Égypte. Son évolution historique reflète le statut socio-économique des populations [52].

Jusqu'au XVIII^{e} siècle, les calculs étaient principalement composés d'acide urique, de phosphates calciques et magnésiens. Au XIX^{e} siècle et dans les pays non industrialisés du XX^{e}, la lithiase touchait surtout les jeunes garçons de milieux défavorisés, avec des calculs vésicaux riches en urate d'ammonium et en phosphates, conséquence d'une alimentation pauvre en phosphore et en protéines animales.

À l'inverse, dans les populations favorisées, elle concernait principalement les adultes, avec des calculs rénaux majoritairement composés d'oxalate de calcium. Depuis la fin du XX^{e} siècle, même dans les pays en développement, la lithiase rénale à base d'oxalate de calcium prédomine et continue d'augmenter à l'échelle mondiale[53].

2.3 Épidémiologie des calculs rénaux

2.3.1 À l'échelle mondiale

Les calculs rénaux touchent entre 5 à 10 % de la population [54]. Leur prévalence varie selon les régions : 7 à 13 % en Amérique du Nord, 5 à 9 % en Europe, et jusqu'à 19,1 % en Asie, notamment dans la « ceinture de calculs » comprenant l'Asie de l'Ouest et du Sud. L'Arabie saoudite enregistre les taux les plus élevés (6,8 à 19,1 %). Une augmentation de la fréquence a été observée dans plusieurs pays du Golfe comme les Émirats, le Koweït et l'Iran [55,56].

2.3.2 En Algérie

Une étude menée dans l'Ouest algérien sur 1354 calculs montre que l'oxalate de calcium monohydraté est le composant principal dans 48,1 % des cas. La struvite, liée aux infections urinaires à germes uréasiques, représente 28,8 % des calculs, soulignant le rôle important des infections dans la lithogenèse locale [56,57]

2.4 Causes et facteurs de formation du calcul

La formation des calculs urinaires est principalement liée à de mauvaises habitudes alimentaires, bien qu'une partie significative soit également associée à des maladies métaboliques, génétiques ou acquises [48,58]

2.4.1 Facteurs nutritionnels

La formation des lithiases urinaires est majoritairement liée à des anomalies métaboliques urinaires résultant de comportements alimentaires inadaptés[44,48].Les études épidémiologiques soulignent que l'alimentation constitue un facteur clé influençant le risque de calculs urinaires [44,48].

2.4.1.a Facteurs nutritionnels directs

a. Oxalate

C'est un facteur important de la lithogénèse oxalocalcique, présent dans de nombreux aliments végétaux [43,59,60].

Une alimentation végétale riche en acide oxalique et pauvre en calcium peut favoriser l'absorption des ions oxalates par l'intestin, ce qui entraîne leur élimination par les reins. Cela peut provoquer une hyperoxalurie, qui est responsable de la formation ou de la croissance de calculs rénaux. Certains aliments sont particulièrement riches en oxalates, notamment le chocolat noir, les épinards et le cacao [43,59,60].

b. Calcium

L'excès d'apport en produits laitiers peut entraîner une hyperoxalurie, ce qui favorise la formation de calculs oxalocalciques et phosphocalciques. Cependant, des études en Grande-Bretagne ont montré que le risque de lithiase calcique augmente avec les apports alimentaires de calcium jusqu'à environ 1 g par jour. Par contre, un régime pauvre en calcium est également associé à un risque accru de formation de calculs [41,59,61,62].

c. Citrate

Une faible consommation de citrate, principalement présent dans les fruits et légumes, est également un facteur favorisant la formation de calculs rénaux, car le citrate agit comme un inhibiteur naturel de la croissance des calculs [63]

d. Les apports hydriques

Une hydratation insuffisante ou mal répartie au cours de la journée constitue le principal facteur favorisant la lithiase urinaire [37,48]. Elle entraîne une augmentation de la concentration des solutés lithogènes, perturbant l'équilibre entre promoteurs et inhibiteurs de la cristallisation. Chez les sujets lithiasiques, une diurèse de 2 à 2,5 L/j est recommandée, contre 1,5 L en climat tempéré, afin de réduire le risque de formation de calculs. Il est essentiel de répartir les apports hydriques sur 24 heures pour éviter les pics de concentration nocturnes, susceptibles de favoriser les récidives. [37,48].

2.4.1.b Facteurs nutritionnels indirects

a. Apports protidiques

De nombreuses études ont examiné l'impact des apports protéiques sur l'excrétion des facteurs lithogènes. Un excès de protéines animales favorise la lithiase urinaire par plusieurs mécanismes : acidification des urines, augmentation de l'excrétion de calcium, d'acide urique et parfois d'oxalate, ainsi qu'une réduction de l'élimination du citrate et du taux de bicarbonates sériques [44,64]

b. Sel :

Une consommation excessive de sel favorise la lithiase urinaire, principalement en augmentant l'excrétion du calcium due à une réduction de sa réabsorption au niveau tubulaire [44]

c. Sucres raffinés

Elles induisent une hyperinsulinémie, entraînant simultanément une réduction de la réabsorption tubulaire du phosphore et une augmentation de l'excrétion tubulaire du calcium, souvent accompagnée d'une élévation de l'élimination urinaire d'oxalate [44,65]

d. Lipides

Une alimentation riche en lipides, en particulier en triglycérides, peut favoriser la libération d'acides gras libres dans la lumière intestinale, contribuant ainsi au développement d'une hyperoxalurie [43].

e. Fibres végétales

La diminution de la consommation de fibres végétales non absorbables est reconnue comme un facteur de risque lithogène à l'échelle macroépidémiologique [44].Cependant, son impact au niveau individuel reste moins évident. Un apport insuffisant en fibres peut perturber l'absorption de nutriments impliqués dans la cristallisation urinaire, en particulier le calcium et l'oxalate [44]

Tableau 1 . Rôle des habitudes alimentaires dans la lithogénèse *[44,48,49]*.

Habitudes alimentaires	Mécanismes
Effets directs	
Apports élevés en calcium	Hypercalciurie
Apports élevés en oxalate	Hyperoxalurie
Apports élevés en purines	Hyperuricurie
Apports faibles en fibres végétales	Hyperocalciurie et oxalurie
Apports faibles en boissons	Augmentation de la concentration des purines
Effets indirects	
Apports élevés en protéines	Hypercalciurie, ph urinaire, hypocitraturie
Apports élevés en lipides	Hyperoxalurie
Apports élevés en sucres raffinés	Hypercalciurie
Apports élevés en sel	Hypercalciurie

2.4.2 Sexe

Les calculs rénaux sont plus fréquents chez les hommes, avec un rapport de 2 hommes pour 1 femme.[66]

Chez la femme, la production d'œstrogènes favorise une phosphaturie accrue et un pH urinaire plus élevé, ce qui influence la nature des calculs.

Chez l'homme, la testostérone stimule l'expression du récepteur de l'α-énolase, favorisant la cristallisation des oxalates de calcium monohydratés [67]

2.4.3 Infection urinaire

Les calculs infectieux sont principalement causés par des germes uréasiques , mais peuvent également résulter d'infections par des germes non uréasiques [68]

2.4.3.a Lithiase secondaire aux germes uréasiques

Certaines bactéries comme *Proteus mirabilis*, *Klebsiella pneumoniae* et *Pseudomonas aeruginosa* produisent de l'uréase, une enzyme qui dégrade l'urée en ammoniac et CO_2. Cette réaction alcalinise l'urine et favorise la formation de calculs composés principalement de struvite (phosphate ammoniaco-magnésien), souvent associés à de la carbapatite. Ces calculs peuvent adopter une forme coralliforme, en se ramifiant dans l'ensemble des cavités du système pyélocaliciel [39,68].

Plus de **200 espèces bactériennes** présentent une activité **uréasique**, mais le **groupe des *Proteus*** est le principal responsable de la formation des **calculs infectieux**. Parmi lesquelles les principales sont répertoriées dans le tableau 2 [68].

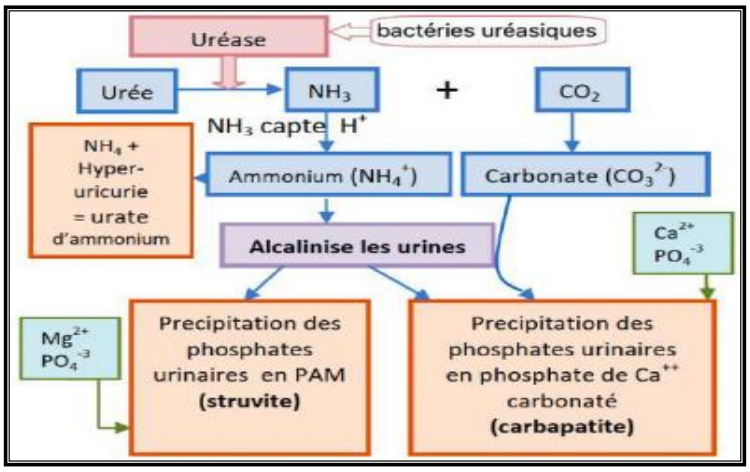


Figure 10 : Schéma illustrant les facteurs influençant la formation des calculs infectieux [69]

Tableau 2 . Principaux bactéries uréolytiques [39,68].

Souches	Fréquence dans les calculs d'infection	Souches avec une activité uréasique
❖ Protéus	76%	90-100%
❖ Pseudomonas aeruginosa	8%	32%
❖ Providencia ✓ -alcalifaciens ✓ -stuartic	6%	90-100%
❖ Klebsiella pneumoniae	5%	
❖ Autres	5%	
✓ Serratia • -marcescens • -liquefaciens		29% 5%
✓ Staphylococcus • -aureus • -epidermidis		80% 88% 100%
✓ Corynbacterium D2		100%
✓ Ureaplasma urealyticum		

2.4.3.b Lithiases secondaires aux germes non uréasiques

Une forte proportion de phosphate amorphe de calcium carbonaté (>20 %) ou de whitlockite (>20 %) suggère l'implication probable d'une infection urinaire à germes non uréasiques, notamment *Escherichia coli*, dans la formation du calcul [39,68].

2.4.4 Anomalies morpho-anatomiques des voies urinaires

Certaines malformations anatomiques du rein ou des voies urinaires, comme le syndrome de la jonction pyélo-urétérale (Fig. 11A), le rein en fer à cheval (Fig. 11B) ou le méga-uretère (Fig. 11C), favorisent la stase urinaire, augmentant ainsi le risque de formation de calculs, surtout en cas de troubles métaboliques associés. Une prise en charge efficace nécessite à la fois le traitement du calcul et, si possible, la correction de l'anomalie anatomique [32,70].

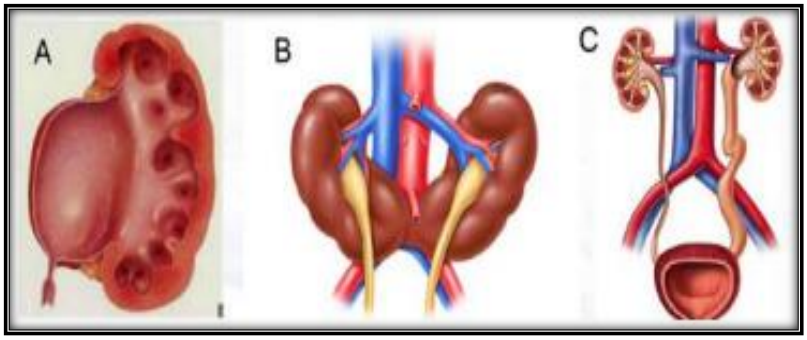


Figure 11 : Anomalies anatomiques de l'appareil urinaire. [69]

2.4.5 Facteur génétique

Certaines maladies génétiques favorisent directement la formation de calculs urinaires [60,71]

- **La cystinurie** est la plus fréquente, due à un défaut héréditaire de réabsorption de la cystine, entraînant une excrétion excessive et la formation de calculs souvent bilatéraux et multiples;
- **L'oxalose**, liée à une hyperoxalurie primitive de type 1, résulte d'un déficit enzymatique hépatique (AGT) causant une production excessive d'oxalate et donc la formation de lithiases.

2.4.6 Syndrome métabolique et lithiase urinaire

Le syndrome métabolique, selon la classification du NCEP AT III (National Cholesterol Education Program), est diagnostiqué en présence d'au moins trois des critères suivants :

- Un tour de taille ≥ 102 cm chez l'homme et ≥ 89 cm chez la femme ;
- Une triglycéridémie > 1,50 g/L ;
- Un taux de HDL-C < 0,40 g/L chez l'homme et < 0,50 g/L chez la femme ;
- Une pression artérielle ≥ 130/85 mmHg ;
- Une glycémie à jeun ≥ 1,10 g/L.

En plus des facteurs de risque lithiasiques liés à une alimentation déséquilibrée, le syndrome métabolique semble favoriser la formation de calculs urinaires composés d'acide urique [52,58,72]

2.4.7 pH urinaire

Le pH urinaire physiologique est d'environ 5,8. Une acidification excessive (pH ≈ 5) favorise la formation de calculs d'acide urique, de cystine et d'oxalate de calcium, tandis qu'un pH alcalin (≈ 7) prédispose aux calculs phosphocalciques et aux lithiases d'origine infectieuse[73,74].

2.4.8 Lithiases médicamenteuses

Les lithiases médicamenteuses représentent environ 1 à 2 % des calculs rénaux. Elles sont classées en deux types : celles causées par des effets métaboliques induits par les médicaments, et celles dues à la précipitation dans l'urine de médicaments ou de leurs métabolites peu solubles, excrétés en grande quantité. (Tableau 3) [75]

Les antirétroviraux comme l'atazanavir et l'indinavir sont les principaux médicaments impliqués dans les lithiases médicamenteuses, tandis que d'autres molécules comme le cotrimoxazole, l'allopurinol, l'amiodarone ou les diurétiques thiazidiques sont plus rarement en cause. Ces calculs, souvent radiotransparents, sont peu visibles au scanner [75]

Tableau 3 . Médicaments et lithiases

Par induction d'un désordre métabolique
❖ Hypercalciurie : vitamine D, calcium, hydroxyde d'aluminium/magnesium ❖ Hyperoxalurie : pyridoxilate, vitamine C, acide oxalique (Praxilène®) ❖ Alcalinisation urinaire et hypocitraturie : acétazolamide (Diamox®) ❖ Hyperuricurie : benzbromarone (Desuric®), amiodarone (Cordarone®), acide tiénilique (Diflurex®) ❖ Hyperxanthinurie : allopurinol (Zyloric®) ❖ Hypocitraturie : diurétiques thiazidiques (Esidrex®, Hygroton®)
Précipitation urinaire de médicament
❖ Triamtérène (Cyclotériam®) ❖ Indinavir (Crixivan®) ❖ Allopurinol (Zyloric®) ❖ Nitrofurantoïne (Furadantine®) ❖ Sulfamides (Bactrim®) ❖ Amoxicilline (Clamoxyl®) ❖ Glafénine (Glifanan®) ❖ Ceftriaxone (Rocéphine®) ❖ Floctafénine (Idarac®) ❖ Trisilicate de magnésium (Gélusil®) ❖ Pectine (Gélopectose®) ❖ Metformine (Glucophage®)

Certains médicaments, comme la vitamine D, favorisent également la formation de calculs en modifiant la composition biochimique de l'urine, notamment par l'induction d'une hypercalciurie.

2.4.9 Autres facteurs

La formation des calculs rénaux est influencée par des facteurs environnementaux, en particulier la chaleur et l'exposition solaire. Les températures élevées, surtout en été, favorisent la déshydratation, concentrent l'urine et facilitent la cristallisation. L'exposition au soleil peut également accroître l'hypercalciurie via la synthèse de vitamine D. Les zones géographiques chaudes et les métiers exposés à la chaleur augmentent ainsi le risque lithiasique.

2.5 Promoteurs et inhibiteurs

La cristallisation urinaire découle d'un déséquilibre entre substances favorisant (promoteurs) et empêchant (inhibiteurs) la formation de cristaux. Une surabondance de promoteurs conduit à la sursaturation, tandis que les inhibiteurs interviennent pour freiner ce processus à divers stades [63].

Tableau 4 . Principaux promoteurs et inhibiteurs

Promoteurs	Inhibiteurs
• **Ions cristallins** : ➢ Calcium ➢ Phosphate ➢ Oxalate ➢ Magnésium ➢ Ammonium ➢ Acide urique ➢ Xanthine • **Autres** ➢ Médicaments ➢ Macromolécules ➢ Lipides	• **Inhibiteurs à bas poids moléculaire** : ➢ Citrate ➢ Pyrophosphates ➢ Magnésium ➢ Zinc • **Macromolécules** ➢ Glycosaminoglycanes ➢ Glycoprotéines ➢ Acide ribonucléique ➢ Surfactants

2.5.1 Promoteurs de la lithogénèse

Les principaux promoteurs et inhibiteurs de la lithogénèse sont présentés dans le tableau suivant.

Les promoteurs de la cristallisation sont des ions qui s'associent entre eux pour former des composés cristallins insolubles. Ces cristaux peuvent adopter diverses formes, influençant la structure et la croissance des calculs urinaires.

2.5.2 Inhibiteurs de la lithogénèse

Les inhibiteurs urinaires de la cristallisation, essentiels à la prévention des calculs, se divisent en deux types (Tableau 5) [63] :

- **Les inhibiteurs de faible poids moléculaire** (comme le magnésium, les pyrophosphates et le citrate) réduisent la sursaturation en complexant les ions ou en retardant la croissance cristalline.
- **Les inhibiteurs macromoléculaires** (glycosaminoglycanes, glycoprotéines, ARN) représentent la majorité de l'activité inhibitrice et freinent la croissance et l'agrégation des cristaux.

Tableau 5 . Inhibiteurs de la cristallisation macromoléculaires

	Oxalate de calcium		Phosphate de calcium	
	Croissance	**Agrégation**	**Croissance**	**Agrégation**
Sulfate de chondroitine	++	++	+	+
Sulfate d'héparane	+++	++		++
Néphrocalcine	++	+		
Protéine de Tamm-Horsfall	+	+++		
UPTF1	+	+++		
Inter-α-trypsine inhibiteur	++			
Bikunine (ex-UAP)	++			
Uropontine	++		++	

2.6 Mécanisme d'initiation de formation des calculs rénaux

Deux mécanismes principaux expliquent l'initiation des calculs rénaux :

- Le mécanisme des particules libres implique la formation de cristaux dans les tubules rénaux, leur agrégation puis l'obstruction des canaux collecteurs. Ces obstructions servent de base à la croissance des calculs, typiquement observée en cas d'hyperoxalurie sévère, avec des calculs d'oxalate de calcium ou d'acide urique [50]
- Le mécanisme des particules fixes repose sur la formation de plaques de Randall (dépôts calciques interstitiels au niveau des papilles rénales) sur lesquelles les calculs se développent. Ce mécanisme est fréquent chez les patients présentant une lithiase calcique idiopathique [50]

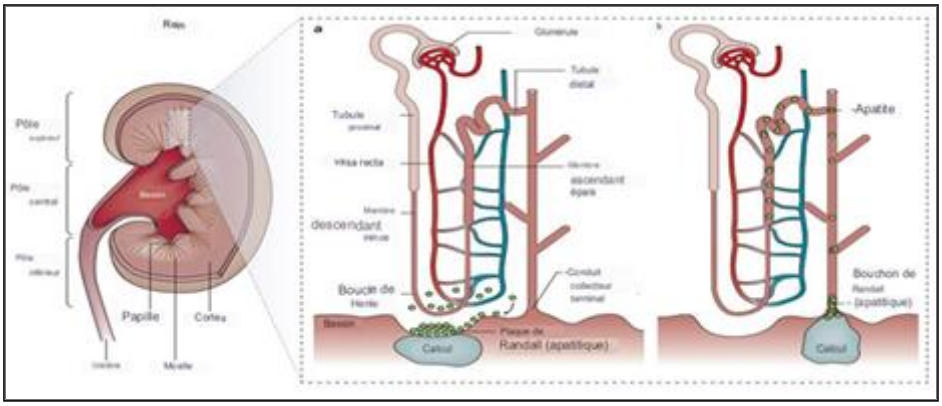


Figure 12 : Mécanisme d'initiation de formation des calculs rénaux [50]

2.7 Lithogenèse

La lithogenèse désigne l'ensemble des mécanismes menant à la formation des calculs urinaires. Elle comprend deux phases [76]:

- **Cristallogenèse** : apparition de cristaux à partir de substances dissoutes, phénomène physiologique en soi.
- **Calculogenèse** : rétention et croissance de ces cristaux dans les voies urinaires, pouvant entraîner la formation de calculs.

  Certaines maladies sont directement associées à la nature des cristaux formés, comme la struvite dans les infections à germes uréasiques, ou les cristaux de cystine dans la cystinurie

2.7.1 Étapes de la lithogenèse

Le processus lithogène peut être décomposé en sept étapes qui se succèdent ou s'entremêlent au cours de la formation du calcul, et qui sont [69] :

1. **Sursaturation urinaire** : Accumulation excessive de solutés dans l'urine, dépassant leur seuil de solubilité, favorisant ainsi la formation de cristaux. Facteurs : faible diurèse, alimentation, troubles métaboliques, infections, anomalies anatomiques, pH urinaire déséquilibré;
2. **Germination cristalline** : Formation des premiers cristaux lorsque la sursaturation atteint un seuil critique. Deux types :
   - **Nucléation homogène** : Formation spontanée de cristaux d'une seule espèce;
   - **Nucléation hétérogène** : Cristallisation favorisée par la présence d'autres cristaux, entraînant des calculs mixtes.
3. **Croissance cristalline** : Augmentation progressive de la taille des cristaux par fixation de nouvelles molécules, pouvant conduire à des particules plus volumineuses dans la vessie;

4. **Agrégation cristalline** : Association rapide des cristaux sous l'effet des forces électrostatiques, formant des particules pouvant être retenues dans les voies urinaires;
5. **Agglomération cristalline** : Stabilisation du calcul par fixation de macromolécules urinaires (protéines), contribuant à sa structure et à sa résistance;
6. **Rétention des cristaux** : Fixation ou blocage des cristaux dans le rein ou les voies urinaires
   - **Adhésion à l'épithélium tubulaire** : Interaction avec les cellules rénales, pouvant provoquer leur apoptose.
   - **Rétention obstructive** : Blocage des cristaux dans le néphron, fréquent dans certaines maladies rénales.
   - **Rétention par stagnation** : Accumulation des cristaux dans des zones où l'urine circule mal.
7. **Croissance du calcul** : Dépend de la cause de la sursaturation. Les calculs peuvent être intermittents (alimentaires), continus (génétiques) ou mixtes;
8. **Conversion cristalline** : Transformation de la composition des calculs sous l'effet des variations biochimiques urinaires, souvent par déshydratation.

Ces étapes successives expliquent la formation et l'évolution des calculs urinaires, influencés par les conditions physiopathologiques du patient.

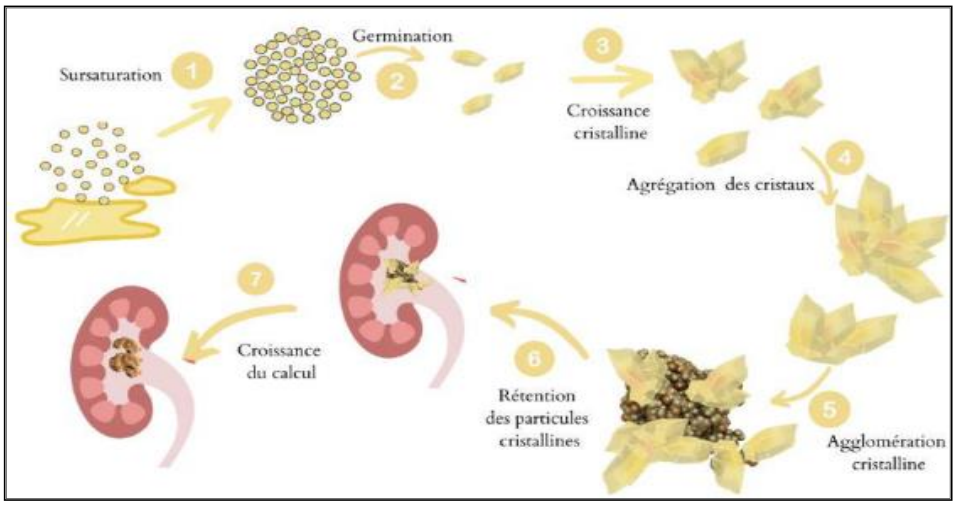


Figure 13 : Schéma illustrant les étapes de la formation des calculs. [69]

2.8 Structure et composition d'un calcul urinaire

Bien qu'il existe plus d'une centaine de composés possibles, chaque calcul est généralement dominé par un constituant principal, les plus fréquents étant l'oxalate de calcium (whewellite, weddellite), le phosphate de calcium (hydroxyapatite) et les urates [39,77].

Tableau 6 . Nature des composants d'un calcul urinaire

La nature des composés	Les composés trouvés
Minéraux	**Phosphates :** carbapatite, hydroxyapatite, PACC (phosphate amorphe de calcium carbonaté), phosphate octocalcique 5H2O, brushite, whitlockite, struvite1, dittmarite, hannayite, newbéryite, bobierrite, phosphate trimagnésien 5H2O. **Carbonates :** calcite, hydroxycalcite. **Sulfates** : gypse, hexahydrite. **Silicates :** opale.
Organique	**Oxalates :** whewellite (oxalate de calcium monohydraté), weddellite (oxalate de calcium dihydraté), caoxite (oxalate de calcium trihydraté). **Purines (Uricite) :** acide urique anhydre, acide urique monohydraté, acide urique dihydraté, urate acide d'ammonium anhydre, urate acide de sodium monohydraté, urate double de potassium et de sodium hydraté, urate acide de potassium anhydre, urate acide de calcium hexahydraté, urate acide de magnésium hexahydraté, acide méthyl-1 urique, dihydroxy-2, 8-adénine, xanthine, hypoxanthine. **Aminoacides** : cystine, tyrosine, leucine. **Protéines :** albumine, bêta2-microglobuline, ostéopontine, lysozyme, fibrine, mucine, hématine, hémoglobine... **Lipides :** triglycérides, cholestérol, esters de cholestérol, palmitate de calcium. **Polysaccharides** (traduisent une souffrance rénale, une réaction inflammatoire du rein).

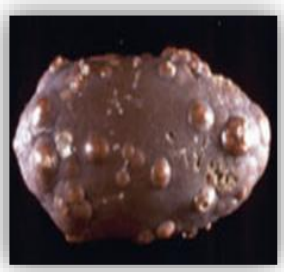
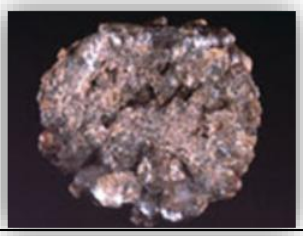
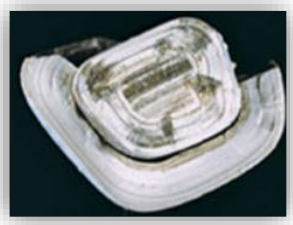
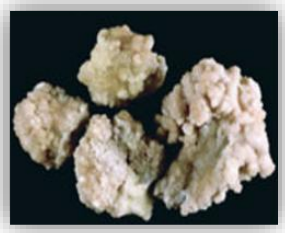
2.9 Classification morpho-constitutionnelle des calculs urinaires

Un même composé, comme le calcium, le phosphate ou l'acide urique, peut se cristalliser sous plusieurs formes, entraînant des variations morphologiques qui reflètent divers mécanismes étiopathogéniques. L'examen morphologique des calculs permet de les classer en sept types principaux et 22 sous-types, comme détaillé dans le tableau 7, accompagné de photos illustrant la surface et la section des calculs.[39].

2.9.1 Type I

L'oxalate de calcium monohydraté (Whewellite) se divise en cinq sous-types (Ia, Ib, Ic, Id et Ie) en fonction de la morphologie interne et externe du calcul [39]. Le tableau 7 présente les principales spécificités de chacun de ces sous-types [39]

Tableau 7 . Caractéristiques des calculs de type I (whewellite) [39]

SOUS TYPE	Principale phase cristalline	Principale caractéristique Morphologique	Surface	Section
Calculs de type I, composées de monohydrate d'oxalate de calcium (COM) ou de whewellite				
Ia	Whewellite	**Surface**:lisse ou mamelonné ou bourgeonnante, aspect parfois finement ridé. **Section**:concentrique compacte à cristallisation radiale. **Couleur**:brun plus ou moinefoncée. Calculs souvent petits, fréquemment d'ombilication unique (points de fixation sur la papille rénale.		
Ib	Whewellite	**Surface :** rugueuse et mamelonnée. **Section :** compacte cristalline inorganisée, parfois lacunaire. **Couleur :** brun foncé à brunnoir.		
Ic	Whewellite	**Surface**:lisse ou bourgeonnante de couleur claire. **Section :** cristalline finement granuleuse inorganisée. **Couleur :** brun clair à crème.		
Id	Whewellite	**Surface** : lisse. **Section** : concentrique compacte microcristalline sans organisation radiale. **Couleur** : brun-jaune clair à grège.		
Ie	Whewellite	**Surface** : mamelonnée avec bourgeonnement locale. **Section** : localement mal organisé ou en cristallisation radiale. **Couleur** : jaune-brun clair au brun.		

2.9.2 Type II

Correspond à l'oxalate de calcium dihydraté (weddellite), avec trois sous-types ; IIa,IIb, et IIc (Tab 8)

Tableau 8 . Caractéristiques des calculs de type II *[39]*

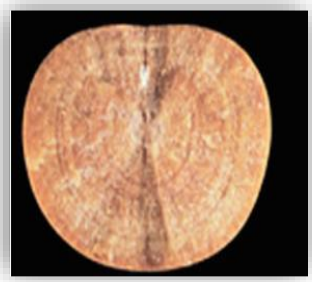
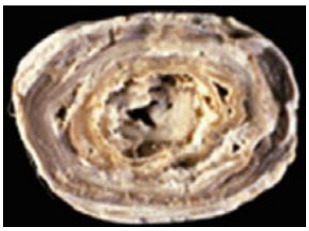
SOUS TYPE	Principale phase cristalline	Principale caractéristique Morphologique	Surface	Section
Calculs de type I, composées de monohydrate d'oxalate de calcium (COM) ou de weddellite				
Iia	Weddellite	**Surface**: cristaux bipyramidaux brillants aux angles vifs **Section** : cristallisation radiale lâche **Couleur** : brun clair, jaune		
IIb	Weddellite	**Surface** : cristaux épais et ternes aux angles émoussés, **Section** : Inorganisé, brun, jaune **Couleur** : beige crème		
IIc	Weddellite	**Surface** : rugueux, **Section** : concentrique en périphérie mais inorganisé au centre brun, jaune plus ou moins foncé **Couleur** : beige à jaune		

.

2.9.3 Type III

Il appartient à la catégorie des purines et se divise en quatre sous-catégories : IIIa et IIIb, correspondant respectivement aux calculs d'acide urique mono- et dihydratés, ainsi que IIIc et IIId, associés aux calculs d'urates.. **(Tab 9)**

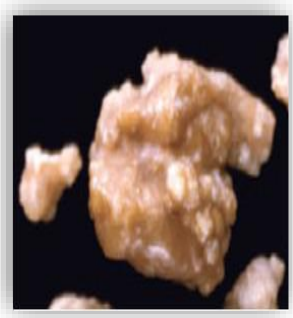
Tableau 9 . Caractéristiques des calculs de type III [39]

SOUS TYPE	Principale phase cristalline	Principale caractéristique Morphologique	Surface	Section
Calculs de type III, principalement composées d'acides ou de sels uriques d'urate				
IIIa	Acide urique Anhydre	**Surface** homogène lisse ou très légèrement bosselée, grège, jaunâtre, ocre ou orange. **Section :** concentrique compacte à cristallisation radiale, ocre, orange ou rouge brique. **Couleur** : en général orange		
IIIb	Acide urique dihydraté (±acide urique de anhydre	**Surface** hétérogène cristalline et/ou microcristalline rugueuse, localement poreuse. **Section :** plus ou moins compacte, cristalline, inorganisée, orange ou rouge brique. **Couleur** : hétérogène de crème à brun- rouge.		
IIIc	Urates	**Surface** : rugueux, poreux, crème à brun **Section :** inorganisé, compacte gris à brun		
IIId	urate d'acide d'ammonium	**Surface** hétérogène, microcristalline, rugueuse, et très poreuse. **Section :** microcristalline concentrique poreuse plus ou moins lâche. **Couleur** : grisâtre, grège au Brunâtre		

2.9.4 Type IV

Il regroupe les phosphates de calcium et de magnésium, et se décline en cinq sous-catégories : IVa1, IVa2, IVb, IVc et IVd. (Tab.10)

Tableau 10 . Caractéristiques des calculs de type IV [39]

SOUS TYPE	Principale phase cristalline	Principale caractéristique Morphologique	Surface	Section
Calculs de type IV, principalement composées de phosphates de calcium et/ou de magnésium (struvite)				
IVa1	Carbapatite	**Surface** : homogène cristalline blanchâtre, grège ou brunjaune, rugueuse bosselé. **Section :** concentrique plus ou moins nette, blanchâtre à beige. **Couleur :** blanchâtre à beige		
IVa2	Carbapatite	**Surface** : homogène, cristalline, d'aspect vernissé, plus ou moins lisse avec des irrégularités de forme évoquant parfois un morceau de silex. **Section** : concentrique plus ou moins feuilletées en couches cristallines brun-jaune épaisses et microcristallines beige, plus fines. La couche superficielle peut être parcoure de fines craquelures. **Couleur**: homogène, brun à jaune.		
IVb	Carbapatite + Struvite	**Surface** : hétérogène bosselée et rugueuse, voire poreuse, blanchâtre et grège à brun. **Section** : concentrique en couches alternées cristallines ou microcristallines blanchâtre épaisses, et grège, fines. **Couleur :** hétérogène, du crème au brun foncé		

IVc	Struvite	**Surface** : homogène cristalline granuleuse en gros cristaux peu anguleux plus ou moins soudés les uns aux autre, ou simplement rugueuse. **Section :** cristalline radiales ou simultanément concentrique et radial lâche. **Couleur :** blanchâtre.		
IVd	Brushite	**Surface :** homogène cristalline rugueuse ou pommelée. **Section :** concentrique compacte à cristallisation radiale. **Couleur :** crème à grège.		

2.9.5 Type V

On trouve dans ce type les calculs de cystine qui comporte deux sous-types : Va, Vb (Tab11)

Tableau 11 . Caractéristiques des calculs de type V*[56]* .

SOUS TYPE	Principale phase cristalline	Principale caractéristique Morphologique	Surface	Section
Calculs de type V, composées de cystine				
Va	Cystine	**Surface :** homogène. Cristalline granuleuse en cristaux peu anguleux ou simplement bosselée : aspect plus ou moins translucide, cireux. **Section** : homogène cristalline radiale diffuse. **Couleur** : jaunâtre à brunjaune clair.		
Vb	Cystine	**Surface** : homogène microcristalline plus ou moins lisse, crème à jaunâtre. **Section** : hétérogène compacte, concentrique et microcristalline crème en périphérie ; cristalline, inorganisée, jaunâtre au centre. **Couleur :** crème à jaunâtre		

2.9.6 Type VI

Il est associé à un ensemble de calculs plus diversifiés, tant par leur composition que par leur lien avec certaines pathologies. Ces calculs se distinguent par une teneur élevée en protéines et se répartissent en trois sous-catégories : VIa, VIb et VIc. **(Tab 12)**

Tableau 12 . Caractéristiques des calculs de type VI [39]

SOUS TYPE	Principale phase cristalline	Principale caractéristique Morphologique	Surface	Section
Calculs de type VI, composé divers (protéine ou médicaments)				
VI a	Protéine	Calculs mous non structuré plus ou moins translucides homogènes **Couleur :** blanchâtres au centre.		
VI b	Protéine ou médicament	Calculs plus ou moins mous hétérogènes, plus ou moins structurés, à surface à la fois rugueuse et écaillable. **Section :** lâche, rugueuse, plus ou moins feuilletée. **Couleur :** brun-noir.		
VI c	Proteine + whewellite	**Surface** : homogène lisse avec des écailles et crevasse. **Section** faite d'une enveloppe protéique brun foncé entourant un centre inorganisé clair contenant un mélange de cristaux de whewellite et de proteines.		

2.9.7 Type VII

Il regroupe des éléments rares et peu communs : dihydroxyadénine, xanthine, oxypurine et calculs liés à des traitements médicamenteux.

Les médicaments les plus souvent associés à la formation de calculs incluent : l'atazanavir, l'indinavir monohydraté, le triamtérène, la silice opaline et la sulfadiazine.

2.9.8 Formes mixtes

Les calculs sont rarement composés d'une seule substance, car les facteurs lithogènes impliqués sont généralement multiples. Ainsi, environ la moitié des calculs présentent une morphologie mixte, combinant deux ou plusieurs types morphologiques (Fig. 13), en raison de la présence de plusieurs espèces cristallines ou chimiques.

Les associations de types morphologiques les plus fréquentes, par ordre décroissant, sont :

- **I (a ou b) + II (a ou b)**, souvent liée à une hypercalciurie et une hyperoxalurie d'origine alimentaire.
- **I (a ou b) + III (a ou b)**, généralement associée au syndrome métabolique ou au diabète de type 2.

- **II (a ou b) + IV a**, habituellement causée par une hypercalciurie absorptive ou résorptive, ou par une hyperparathyroïdie primaire.

Tableau 13 . Calculs mixtes [39]

Mélange	Aspect
Ia+Iia	
Ia+IIb	
Ia+ Iva	
Ia +IIIa **(à gauche nucléation sur corps étranger)**	 
Ia+ VI (Jackstone)	 

2.10 Exploration de la lithiase urinaire

L'exploration repose sur une enquête étiologique systématique et indispensable pour chaque patient lithiasique. Elle comprend l'analyse du calcul et la recherche des facteurs de risque

lithogènes à partir des données cliniques, radiologiques et biologiques, pour une meilleure prise en charge thérapeutique et prévention des récidives [37,48].

2.10.1 Interrogatoire

Permet de rechercher l'essentiel des facteurs de risque : antécédents personnels et familiaux, facteurs environnementaux, prise de médicaments lithogènes, habitudes alimentaires ; et permet de retracer l'histoire de la maladie lithiasique à savoir : âge du début, chronologie des épisodes lithiasiques, nombre de calculs expulsés [48].

2.10.2 Symptomatologie

2.10.2.a Haut appareil urinaire

- **Colique néphrétique :** Douleur aiguë intense, pouvant s'accompagner de fièvre, d'anurie et d'un syndrome hyperalgique, signes de gravité nécessitant une prise en charge urgente.
- **Hématurie** : Présence de sang dans les urines, due à l'irritation mécanique des voies excrétrices.
- **Infections urinaires :** Facteur de risque et élément aggravant, favorisant les calculs volumineux et coralliformes, plus fréquents chez les femmes. Une bactériurie résistante peut révéler une lithiase.
- **Insuffisance rénale :**
  - **Aiguë** : Obstruction bilatérale ou d'un rein unique, parfois due à un choc septique.
  - **Chronique** : Obstruction prolongée évoluant vers une insuffisance rénale chronique (IRC) chez 4 % des patients lithiasiques.
- **Lithiase asymptomatique :** Découverte fortuite lors d'un examen d'imagerie [37,48].

2.10.2.b Bas appareil urinaire

Les calculs du bas appareil se manifestent par des troubles urinaires fonctionnels : hématurie, brûlures mictionnelles, pollakiurie, interruption du jet urinaire et douleurs lors de la miction [48] [69].

2.10.3 Diagnostic radiologique

L'imagerie constitue l'examen de référence pour le diagnostic des calculs urinaires. Son rôle est triple [37] [48] :

- **En cas de colique néphrétique aiguë (CNA)** : elle permet un diagnostic rapide, l'évaluation de l'impact sur l'arbre urinaire et l'exclusion d'autres pathologies.

- **Pour le bilan pré-thérapeutique** : elle sert à analyser la perméabilité et l'anatomie des voies urinaires afin d'orienter la prise en charge.
- **En post-thérapeutique**, l'imagerie permet d'évaluer l'efficacité du traitement et de détecter d'éventuels fragments résiduels.

  - **La radiographie** : des reins, uretères et vessie permet de détecter la plupart des lithiases, sauf celles en acide urique. Elle fournit des informations sur le nombre, la taille et la localisation des calculs, ainsi qu'une estimation approximative de leur composition basée sur leur radio-opacité. Cependant, cette approche reste incomplète et imprécise**.**
  - **L'échographie de l'appareil urinaire :** une technique non invasive, permet de détecter toutes les lithiases, y compris celles en acide urique, et de repérer d'éventuelles obstructions. Cependant, sa capacité à visualiser les calculs urétéraux reste limitée.
  - **Une pyélographie intraveineuse :** Permet d'évaluer l'anatomie et le fonctionnement des voies urinaires, tout en déterminant la cause, la localisation et la gravité de l'obstruction.



Figure 15 : Image de lithiase de bas uretère droit et d'une lithiase de vessie à l'ASP [87]



Figure 14 : Image de lithiase coralliforme [87]



Figure 16 : Image de lithiase bloquée dans l'urètre postérieur à l'ASP [87]



Figure 17 : Image de lithiase urétérale gauche à la projection de L2 [87]

- **Tomodensitométrie spiralée (TDM)** : rapide et très précise, est l'examen de référence pour diagnostiquer la colique néphrétique aiguë. Toutefois, en raison de l'exposition aux radiations, l'échographie reste l'alternative privilégiée chez les enfants [69]..

2.10.4 Formes cliniques

2.10.4.a Selon la topographie

- **Lithiase rénale coralliforme :** se manifeste par une douleur lombaire, des épisodes d'hématurie et des troubles urinaires comme la pollakiurie.
- **Lithiase rénale coralliforme bilatérale :** présente des symptômes similaires, mais en cas d'obstruction complète, elle peut entraîner une anurie lithiasique.
- **Lithiase urétérale :** se caractérise par une colique néphrétique accompagnée d'hématurie et de troubles urinaires.
- **Lithiase vésicale :** provoque une douleur sous-pubienne associée à des troubles urinaires et des épisodes d'hématurie.
- **Lithiase urétrale :** se manifeste par une rétention aiguë d'urine ou une pollakiurie si l'obstruction est [37,48].

2.10.5 Examens biologiques de première intention

Peu nombreux, et d'un coût modéré, ils recherchent les principales anomalies lithogènes et évaluent les habitudes alimentaires. Ils doivent être réalisés en externe dans les conditions habituelles d'activité, d'alimentation et de boissons du patient, et débutés six semaines après

un épisode lithiasique ou une manœuvre thérapeutique. Les résultats sont interprétés en termes de débit par 24h [78].

2.10.5.a Diagnostic positif [78]

Il concerne tous les patients, y compris ceux ayant présenté un premier calcul. Il doit être réalisé à distance d'un épisode aigu ou d'un traitement (1 à 2 mois après). Cet examen, effectué dans des conditions alimentaires habituelles, complète l'enquête nutritionnelle et permet d'évaluer les habitudes du patient. Une fois le diagnostic de néphrolithiase posé, une évaluation doit être effectuée, comme l'indique le tableau 14**.**

Tableau 14 . Evaluation clinique des patients atteints de néphrolithiase

Antécédents	❖ Antécédents de lithiase ❖ Antécédents médicaux associés à une maladie prédisposant à la néphrolithiase : sarcoïdose, maladie intestinale inflammatoire, affection maligne ; ❖ Antécédents familiaux : âge du début, type de néphrolithiase ; ❖ Médicaments : diurétiques de l'anse, indinavir ❖ Antécédents sociaux : occupation ❖ Alimentation : liquide, protéines, purines, sodium, calcium, oxalate.
Examen de laboratoire	❖ Analyse d'urine et culture ❖ Ionogramme sanguin, urée sanguine, créatinine, calcium, phosphore, acide urique, ❖ Parathormone si le calcium est élevé. ❖ Analyse du calcul

L'exploration biochimique d'un patient lithiasique repose sur plusieurs examens [78] :

- **Analyses sanguines** : glycémie, urée, créatinine, calcium, phosphore, magnésium, acide urique, sodium et PTH.
- **Analyses urinaires sur 24 heures** : mesure du calcium, phosphore, acide urique, créatinine, urée, sodium et protéinurie.
- **Analyse de la première miction matinale** : évaluation du pH, de la densité urinaire et recherche de cristaux.
- **Examen cytobactériologique des urines (ECBU)**.
- **Analyse du calcul** : essentielle pour identifier sa composition, permettant ainsi de mieux comprendre les désordres métaboliques sous-jacents, car le calcul est un symptôme d'un déséquilibre métabolique.

2.11 Traitement médical préventif des lithiases urinaires

Le traitement des calculs déjà formés dans les reins ou les voies urinaires repose sur une association de mesures médicales et chirurgicales. Le choix du traitement spécifique dépend de

plusieurs facteurs : la localisation du calcul, le degré d'obstruction qu'il entraîne, la fonction du rein atteint et du rein controlatéral, la présence ou non d'une infection urinaire, la migration éventuelle de la lithiase dans les voies urinaires, ainsi que les risques opératoires et anesthésiques, en tenant compte de l'état général du patient [79] [80].

Lors de la phase aiguë de la colique néphrétique, la prise en charge vise principalement à soulager la douleur, traiter une éventuelle infection, localiser et évaluer la taille du calcul, et favoriser son élimination. Les calculs urétéraux ≤ 4 mm s'éliminent généralement spontanément, tandis que les chances diminuent au-delà de cette taille. Une consultation urologique urgente s'impose en cas d'infection urinaire, d'insuffisance rénale aiguë, de douleurs persistantes, de troubles digestifs, ou si le calcul dépasse 10 mm ou résiste au traitement médical. Le recours à des techniques urologiques comme la lithotripsie extracorporelle, l'urétéroscopie ou la néphrolithotomie percutanée peut alors être nécessaire [81]

2.11.1 Traitement médical de douleur néphrétique

Le traitement recommande pour calmer la douleur en prescrivant les médicaments suivants : Anti-inflammatoire non stéroïdiens par voie intraveineuse lente ou dans une perfusion glucosée 5% à passer en 30 minutes (Profénid® /100, Indocid®, Voltarène®) Antispasmodiques (Spasfon Lyoc®) Ces deux médicaments peuvent être administrés dans la même perfusion. Si la douleur ne cède pas en une demi-heure, on peut renouveler l'injection.

Dans certains ces rebelles, on peut être amené à administrer des antalgiques «périphériques » majeurs (Viscéralgine Forte®, Baralgine®, Avafortan®), voir des analgésiques « centraux » (Temgésic®).

Arrêt des boissons pendant la crise, puis reprise d'une hydratation abondante après la crise.Le type des besoins conseillés varie en fonction du calcul à traiter [82,83].

2.11.2 Traitement médical de lithiase calcique

Le traitement ne permet pas de dissoudre les calculs calciques, mais vise à prévenir leur récidive**.**

Chez les patients présentant une hypercalciurie**,** les diurétiques thiazidiques réduisent l'excrétion urinaire de calcium en augmentant sa réabsorption tubulaire rénale et en diminuant son absorption intestinale. Ils représentent le traitement de première intention en cas de syndrome de fuite rénale et se sont révélés efficaces chez les patients atteints d'hypercalciurie

idiopathique. L'association au citrate de potassium permet de prévenir l'hypokaliémie induite par les thiazidiques, tout en augmentant la citratémie**,** ce qui limite la formation de calculs.

En cas d'hyperparathyroïdie primaire, la chirurgie parathyroïdienne constitue le traitement de référence chez les patients lithiasiques.

Certains médicaments doivent être évités, car ils augmentent la calciurie, notamment la vitamine D, la vitamine A et les gels d'albumine. À l'inverse, des agents comme la calcitonine peuvent limiter l'hypercalciurie d'immobilisation en favorisant la fixation osseuse du calcium.

Lorsque la citraturie est faible (hypocitraturie)**,** l'administration de sels alcalins de potassium réduit significativement le risque de récidive. Le citrate de potassium est généralement prescrit à des doses de 15 à 30 mEq, 2 à 3 fois par jour, jusqu'à un maximum de 100 mEq/jour.

Pour les lithiases de phosphate de calcium liées à une acidose tubulaire distale (type I)**,** l'objectif thérapeutique est de corriger l'acidose métabolique**,** ce qui permet de diminuer la résorption osseuse, l'excrétion calcique et d'augmenter la citraturie. Des doses élevées de bicarbonate ou de citrate de potassium sont souvent nécessaires. Un thiazidique peut être ajouté si l'hypercalciurie persiste.

L'oxalurie primaire est prise en charge par une réduction de l'apport alimentaire en oxalate et une hydratation abondante. Certains patients bénéficient d'un traitement par pyridoxine (vitamine B6).

En cas d'hyperoxalurie entérique**,** l'administration de calcium au moment des repas permet de lier l'oxalate alimentaire, limitant ainsi son absorption. Un régime pauvre en graisses et l'ajout de cholestyramine, qui se lie aux acides biliaires, peuvent également être bénéfiques. Chez les patients ayant une diarrhée chronique avec acidose métabolique, le citrate de potassium est un traitement adjuvant recommandé.

Enfin, pour les hyperuricosuries**,** une restriction des aliments riches en purines et une augmentation des apports hydriques sont essentielles. En cas de persistance, un traitement par allopurinol est indiqué [82,83].

2.11.3 Traitement médical de la lithiase urique

Le traitement de lithiase urique repose sur trois modes :

Alcalinisation des urines : les calculs d'acide urique ne se forment pas si le pH urinaire est supérieur à 6,5. L'objectif est donc de maintenir un pH à plus de 6,5 pour éviter la formation de calculs et pour dissoudre les calculs en place. Il existe différents agents alcalinisants :

- Le bicarbonate de soude ou mieux, l'eau de Vichy Célestins (3/4 litre par jour)
- Le citrate de sodium ou de potassium : **Foncitril** 4000 (3 sachets par jour), Alcophor (3cuillers à soupe par jour), **Piperazine** (3 cuillers à café par jour) [84].

Le traitement alcalinisants impose quatre impératifs :

- Le calcul ne doit pas être obstructif pour qu'il baigne dans les urines alcalines.
- Il faut vérifier l'efficacité de l'alcalinisation en contrôlant le pH urinaire par bandelette (≥6,5).
- Il faut rechercher une infection urinaire qui impose l'arrêt du traitement et la prescription d'ATB.
- Il faut éviter l'apport de sodium des sels alcalinisants chez les sujets hypertendus et eninsuffisance cardiaque [84].

Le régime alimentaire : il doit être hypocalorique, pauvre en protéine et donc hypoprotidique.Les aliments à éviter sont : les charcuteries, les abats, les crustacés.

l'administration d'Allopurinol : c'est un inhibiteur de la xanthine oxydase, indiqué lorsqu'il existe une hyperuricémie avec hyperuricosurie [84].

2.11.4 Traitement médical de lithiase infectieuse

Ce sont des calculs qui se forment au cours des infections urinaires, en pH alcalin et en présence de germes uréasiques (Proteus). Le traitement repose sur l'interdiction des boissons alcalines ou l'acidification d'urine par l'acide mandélique, chlorure d'ammonium, …etc, et la stérilisation des urines par une antibiothérapie adopté à la bactérie uréasique. Un traitement par l'acide acétohydroxamique (inhibiteur de la production d'uréase) est avéré capable de réduire le taux de croissance des lithiases, mais est mal toléré en raison d'effets secondaire multiples [84].

2.11.5 Traitement médical de lithiase cystinique

C'est la complication majeure de la cystinurie, maladie congénitale autosomique, récessives. Le régime pauvre en méthionine précurseur de la cystéine, nécessite la suppression de la plupart

des protides (peu utilisable). La diurèse doit être d'au moins trois litres par jour avec alcalinisation supérieure à 7,5 de façon à maintenir une cystinurie inférieur à 200 mg/l dans le but d'augmenter la solubilité de cystine dans les urines. Le traitement par la D-pénicillamine est réservéaux patients dont la tolérance digestive aux alcalins est médiocre et ceux qui gardent une cystinurie supérieur à 200 mg/l. elle doit toujours être associée à la vitamine B6 pour éviter les réactions d'hypersensibilité aigue à cette ATB [84].

2.12 Traitement urologique des lithiases urinaires

Alors que le traitement médical a peu évolué, l'apparition des nouvelles techniques de traitement urologique des calculs urinaires durant ces dernières années, a révolutionné le monde urologique. Une meilleure connaissance des caractéristiques de ces nouveaux moyens devient indispensable. Elle permet de mieux comprendre les indications thérapeutiques actuelles de la lithiase urinaire. Ces moyens urologique sont [84]:

2.12.1 Lithotritie extracorporelle (LEC)

Cette technique consiste la destruction (*in situ)* du calcul par des ondes de choc produites par un générateur externe. L'élimination des fragments lithiasiques se fait par la voie excrétrice. Le lithotriteur comporte un système de repérage du calcul et un générateur d'ondes de choc. Ces ondes sont focalisées sur le calcul en transcutané par repérage radiologique ou échographie. Le repérage radiologique concerne les calculs radio-opaques de l'ensemble de l'arbre urinaire, et le repérage échographique concerne les calculs situé dans les cavités rénales, l'uretère terminal et la vessie. Selon le type de générateur, elle peut être réalisé sans ou avec anesthésie et cet moyen nécessite de vérifier que les urines sont stériles. Les fragments doivent ensuite être éliminés par voie naturelle (colique néphrétique dans 20% des cas) [84].

Les indications de LEC sont larges car cette technique permet de traiter la plupart des localisations lithiasiques (les calculs < 2 cm), cependant, le volume du calcul peut contre indiquer cette technique lorsqu'il est important, faisant préférer une technique chirurgicale classiqueou endo-urologique. La LEC est une technique avec succès sur plus de 70% des calculs urinaires [84].

2.12.2 Lithotritie intracorporelle

Existe sous deux techniques

Néphrolithotomie percutanée (NLPC) : cette technique consiste la fragmentation et l'extraction du calcul de façon endoscopique par l'abord direct des cavités rénales par voie percutanée après ponction et dilatation du trajet urinaire. Elle comporte deux phases :

Création d'un tunnel trans-pariétal permettant l'introduction d'un néphroscope (une gaine + un système optique) jusqu'à les cavités rénales. Ce geste nécessite une anesthésie générale.

L'extraction des calculs : Cette technique s'adresse essentiellement aux calculs pyéliques ou calciels et parfois aux calculs de l'uretère immédiatement sous-pyélique (> 2 cm). Il donne 84% de succès, 16% d'échecs de ponction [84].

2.12.3 Chirurgie ouverte (classique)

La chirurgie a depuis longtemps fait la preuve de son efficacité, malgré le développement des nouvelles techniques. Elle garde encore quelques indications ; en cas des calculsvolumineux coralliformes ou pour traiter une affection qui favorise la lithiase : syndrome de la jonction pyélo-urétérale, sténose urétérale, adénome de prostate responsable de calculs vésicaux.

La prise en charge chirurgicale de la lithiase rénale a beaucoup progressé, notammentpar la mise au point d'endoscopes de petit calibre donnant accès aux différentes zones du rein et par

L'amélioration des gaines d'accès urétéral réduisant le risque de traumatisme de l'uretère. Bien que la thérapie chirurgicale continue à jouer un rôle majeur dans le traitement de la lithiase rénale, les études des mécanismes pathologiques déterminant la formation des calculs pourraient fournir de nouvelles options thérapeutiques. La mesure des forces d'adhérence à la surface des calculs chez leslithiasiques pourrait contribuer à la conception d'agents capables de bloquer la formation descristaux. Un autre domaine à explorer est le rôle de molécules comme l'hyaluronane dans la rétention et la croissance des cristaux auxquelles elles s'attachent [84].

CHAPITRE II

Méthodes de Caractérisation physico-chimique des lithiases urinaires

1 Introduction

L'analyse des lithiases urinaires repose sur l'étude conjointe de leurs caractéristiques morphologiques et constitutionnelles. Il est désormais bien établi que la majorité des calculs sont hétérogènes [85] [49,86,87], associant plusieurs constituants physico-chimiques au sein d'une même couche ou dans des couches concentriques successives [49,86]. Il est donc indispensable d'analyser l'ensemble des zones morphologiquement distinctes, en surface comme en section, afin d'obtenir une évaluation représentative de leur composition.

Aucune technique isolée ne permet aujourd'hui d'identifier de manière exhaustive la structure et la composition des calculs urinaires. C'est pourquoi il est nécessaire de recourir à des approches complémentaires, capables de fournir des informations sur la composition chimique, la nature cristalline des phases, ainsi que la structure interne des échantillons [88]

Les méthodes disponibles peuvent être classées en deux grandes catégories :

- **Les techniques chimiques** (qualitatives ou quantitatives)
- **Les techniques physiques** (méthodes optiques, spectroscopiques ou thermiques)

2 Techniques chimiques

2.1 Méthodes qualitatives

Ce sont les méthodes les plus anciennes, encore largement utilisées en routine. Elles reposent sur la réaction d'ions ou de molécules avec des réactifs spécifiques, produisant des colorations ou des précipités caractéristiques [89,90] **.**

2.1.1 Avantages

- Simples à mettre en œuvre;
- Peu coûteuses;
- Réalisables dans la plupart des laboratoires [13].

2.1.2 Limites

- Nécessitent une quantité d'échantillon importante, ce qui complique l'analyse de calculs de petite taille;
- Risque de faux positifs/négatifs en raison d'une sensibilité variable;
- Elles ne permettent pas d'associer les ions qu'elles caractérisent et n'apportent aucune information cristallographique;
- Ne permettent pas l'identification de métabolites rares ou lithiases médicamenteuses;

- Reposent uniquement sur la détection de substances connues et fréquentes [13,22,91].

2.2 Méthodes quantitatives

Basées sur des dosages chimiques ou biochimiques développés pour l'analyse biologique (sang, urines), ces méthodes permettent de quantifier certains ions courants. Leur sensibilité est généralement meilleure, mais elles restent longues, limitées dans leurs capacités de détection, et soumises aux mêmes biais que les méthodes qualitatives [89].

En résumé, les méthodes chimiques seules sont insuffisantes pour une caractérisation fiable, mais peuvent être utiles en complément de techniques physiques [90–92]

3 Techniques physiques

Les techniques physiques offrent une meilleure précision analytique, notamment par leur capacité à identifier les phases cristallines et à analyser de très faibles quantités de matière de l'ordre de picogrammes à milligrammes [13,93]

Bien que diverses méthodes physiques soient disponibles pour l'étude des lithiases urinaires telles que la microscopie électronique à balayage (MEB), la diffraction des rayons X (DRX), la spectrométrie de masse, ou encore l'analyse élémentaire (EDS), ce chapitre se concentrera sur trois approches principales : l'observation morphologique à la loupe binoculaire, la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier en mode ATR (FTIR-ATR), et l'analyse thermique (TGA-DSC) [13]

Ces méthodes ont été sélectionnées pour leur accessibilité, leur complémentarité et leur aptitude à fournir des informations structurales, chimiques et thermiques précises sur les calculs urinaires.

3.1 Observation morphologique à la loupe binoculaire:

La loupe binoculaire ou stéréomicroscope, est un outil essentiel pour l'analyse morphologique [92,94,95], offrant une vision détaillée et en relief qui facilite l'observation précise des structures complexes [96].

3.1.1 Principe

La loupe binoculaire, ou stéréomicroscope, est un instrument d'observation optique permettant l'examen tridimensionnel d'objets opaques, à faible ou moyenne grossissement (généralement de ×10 à ×100) [96,97]

Contrairement au microscope optique classique, elle offre une vision en relief, facilitant l'examen des structures macroscopiques et superficielles. Elle repose sur un système de double

oculaire fournissant deux images légèrement décalées, que le cerveau fusionne pour créer une perception stéréoscopique [97].

Le principe repose sur l'utilisation de la lumière réfléchie : l'échantillon est éclairé par une source lumineuse externe, généralement annulaire ou latérale, et la lumière réfléchie est recueillie par les objectifs. Cette approche permet l'observation non destructive de la surface, de la texture, de la couleur ainsi que de la structure externe des objets solides.

Dans le cas des échantillons transparents, l'utilisation de la lumière transmise permet d'améliorer la visibilité et la distinction des détails internes.[98].

3.1.2 Appareillage

La loupe binoculaire est composée de plusieurs éléments essentiels [98,99] :

- **Tête binoculaire :** Deux oculaires offrant une vision en relief pour une perception en trois dimensions;
- **Oculaires :** Généralement de 10x, avec possibilité d'autres grossissements et équipés d'œilletons pour plus de confort;
- **Objectif :** Détermine le grossissement total, souvent combiné avec les oculaires (ex. 10x oculaires + 2x objectif = 20x);
- **Platine porte-objet** : Surface fixe ou mobile où l'échantillon est placé, parfois équipée de ressorts pour le maintenir;
- **Système d'éclairage :** Éclairage incident (supérieur) et parfois transmis (inférieur), souvent à LED pour une meilleure visibilité sans surchauffe;
- **Molette de mise au point** : Permet d'ajuster la netteté de l'image, avec des réglages macro métriques pour plus de précision;

3.1.3 Applications de la loupe binoculaire [99]

- **Chimie :** Analyse des cristaux, poudres et surfaces de polymères pour comprendre leurs propriétés;
- **Médecine :** Analyse morphologique des lithiases urinaires pour le diagnostic et le traitement;
- **Biologie** : Observation détaillée d'échantillons biologiques (insectes, plantes, tissus);
- **Entomologie :** Identification et étude des insectes grâce à une vision claire de leur morphologie;
- **Géologie :** Examen des pierres et minéraux pour étudier leur structure et composition;

- **Mécanique :** Aide à l'assemblage et à la retouche de petites pièces mécaniques;
- **Matériaux :** Analyse des surfaces et mesure de rugosité pour le contrôle qualité;
- **Éducation** : Utilisée dans l'enseignement pour des démonstrations pratiques en sciences;

Cette technique est utilisée en première intention dans l'analyse morpho-constitutionnelle des calculs urinaires. Elle permet :

- D'évaluer la forme, la couleur, la texture et l'organisation des couches (concentriques, radiales ou amorphes) ;
- De détecter l'hétérogénéité du calcul ;
- D'orienter le prélèvement des zones d'intérêt pour une analyse spectroscopique ou thermique ultérieure ;
- De proposer une classification morphologique selon les types décrits par Daudon.

3.1.4 Avantages de la loupe binoculaire

3.1.4.a Principaux avantages

Constituant souvent la première étape d'analyse pour ces raisons[13] :

- **Vision stéréoscopique** : permet une observation en trois dimensions avec une bonne perception de la profondeur;
- **Grande profondeur de champ** : facilite l'analyse des surfaces et textures en visualisant plusieurs couches d'un échantillon simultanément;
- **Facilité de manipulation** : grâce à une distance de travail confortable, elle permet d'interagir avec les échantillons tout en les observant;
- **Simplicité d'utilisation** : ne nécessite pas de préparation complexe, offrant une observation rapide et efficace;
- **Polyvalence** : utilisée dans des domaines variés (éducation, recherche scientifique, contrôle qualité industriel);
- **Éclairage optimisé** : modèles équipés d'un éclairage incident et transmis pour améliorer la visibilité et révéler les détails morphologiques.

3.1.4.b Avantage dans l'analyse des lithiases urinaire [13]

- Technique simple, rapide et non destructive;
- Ne nécessite pas de préparation complexe de l'échantillon;
- Fournit des informations visuelles précieuses sur la structure macroscopique du calcul;
- Permet une sélection ciblée des zones à analyser par d'autres méthodes (FTIR, TGA-DSC).

3.1.5 Limites

- **Analyse uniquement macroscopique**

- Elle ne permet d'observer que l'aspect externe ou la coupe brute du calcul;
- Elle ne donne pas une information précise ou complète sur la composition chimique des constituants, nécessitant des techniques complémentaires comme la spectroscopie infrarouge

- **Grossissement limité :** insuffisant pour observer les structures fines et certaines composantes cristallines spécifiques.
- **Profondeur de champ réduite :** peut ne pas être suffisante pour analyser des échantillons épais ou complexes.
- **Dépendance à l'éclairage :** une illumination inadéquate peut compromettre l'observation des détails morphologiques.
- **Interprétation dépendante de l'expérience**

- L'identification morphologique est subjective et repose sur l'expertise de l'opérateur;
- Il peut y avoir des confusions entre certains types morphologiques si la classification n'est pas maîtrisée.

- **Difficulté d'interprétation en cas de calculs mixtes**

- Les calculs hétérogènes (avec plusieurs couches de compositions différentes) peuvent présenter des morphologies complexes ou atypiques, rendant leur lecture difficile [13]

Il est souvent nécessaire de combiner son utilisation avec d'autres techniques analytiques pour obtenir une caractérisation complète des calculs urinaires [13,92].

3.2 Spectrométrie par réflexion dans l'IR moyen

La spectroscopie infrarouge (SPIR) est la méthode de choix pour l'analyse des calculs urinaires [22,50]. Elle permet d'obtenir une empreinte spectrale spécifique à chaque espèce chimique, même en cas de mélanges complexes ou de quantités très faibles [92,100]. Grâce à sa fiabilité et à son accessibilité, la SPIR est devenue une technique de référence dans le domaine de la lithiase urinaire, tant en recherche qu'en pratique clinique [50,91,92].

3.2.1 Principe

L'infrarouge met à profit la plage des radiations entre 0,8-50 µm, Pour identifier ou doser des composés par procédés basés sur l'absorption ou bien la réflexion de la lumière par l'échantillon [101,102].

Elle est classiquement divisé en trois zones : l'infrarouge proche (NIR), l'infrarouge moyen (MIR) et l'infrarouge lointain (FIR) [103] .

L'analyse des substances en spectroscopie infrarouge repose principalement sur la région de l'infrarouge moyen, qui couvre une large gamme de vibrations moléculaires. En particulier, la zone située en dessous de 1500 cm^{-1}, connue sous le nom de « région des empreintes digitales », est d'une grande complexité. Elle fournit un ensemble dense et spécifique de bandes d'absorption qui constitue une véritable signature spectrale propre à chaque molécule [102,104].

L'identification qualitative d'un composé s'effectue par comparaison de son spectre avec celui d'une référence obtenue dans les mêmes conditions expérimentales, ou avec un spectre étalon issu d'une base de données. Cette approche est d'une grande fiabilité, chaque substance chimique présentant un profil spectral unique, à l'exception de certains stéréoisomères comme les énantiomères, qui ne peuvent être distingués par cette méthode [93,100,105]

Le polymorphisme, la dimension et l'orientation des cristaux, la méthode de broyage utilisée, ainsi que la présence potentielle de formes hydratées peuvent entraîner des variations dans le spectre infrarouge. Bien que ces altérations soient généralement faibles, elles peuvent, dans certains cas, modifier de façon notable certaines bandes d'absorption, ce qui peut compliquer l'interprétation des données spectrales [106,107]

3.2.2 Modes de mesure

L'enregistrement des spectres infrarouges peut se faire selon deux modalités principales : en transmission ou en réflexion [108–110] Les spectres obtenus en mode réflexion, notamment dans l'infrarouge moyen, fournissent des informations comparables à celles issues de la transmission, bien qu'ils nécessitent souvent un traitement mathématique pour corriger les distorsions liées au mode de détection [111]. Ces spectres peuvent être utilisés tant pour l'analyse qualitative que pour l'analyse quantitative des échantillons [107].

Selon la nature de l'interaction entre le rayonnement et la surface de l'échantillon, plusieurs types de réflexion peuvent être distingués [102,112,113] :

- Réflexion spéculaire ;
- Réflexion interne ;

- Réflexion diffuse ;
- Réflexion totale atténuée (ATR).

Dans le cadre de notre étude, nous avons retenu exclusivement la technique d'ATR (Attenuated Total Reflectance), méthode de choix pour l'analyse des solides, notamment des lithiases urinaires, en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de sa reproductibilité.

3.2.3 Spectrométrie par réflexion totale atténuée (ATR)

Cette méthode consiste à déposer l'échantillon sur un cristal à indice de réfraction élevé. Le faisceau infrarouge incident pénètre dans le cristal, se réfléchit à l'interface avec l'échantillon, provoquant des vibrations et rotations des atomes de la molécule les uns par rapport aux autres, puis le spectre infrarouge est capturé à l'aide d'un spectrophotomètre à transformée de Fourier [104] [107] [110] [112] .

3.2.3.a Principe de l'ATR

La spectroscopie infrarouge en mode ATR s'appuie sur le principe de la réflexion interne totale, comme illustré dans la figure 18, qui intervient lorsque la lumière infrarouge traverse un cristal à fort indice de réfraction (n_c) (ex. : Ge, ZnSe, diamant, etc.) et atteint une interface avec un matériau (échantillon) d'indice plus faible (n_s) [113,114]. Lorsqu'un faisceau infrarouge pénètre le cristal sous un angle d'incidence θi, mesuré par rapport à la normale à la surface, il peut subir à la fois réflexion et réfraction selon la valeur de cet angle (Figure 105). Si **l'**angle d'incidence (θi), mesuré par rapport à la normale à la surface, est inférieur à une certaine valeur critique, une partie de la lumière est transmise dans l'échantillon sous un angle de réfraction (θ_R), tandis que l'autre est réfléchie dans le cristal [113].

Lorsque θi atteint une valeur seuil appelée angle critique (θc), l'angle de réfraction atteint 90°, et toute l'énergie lumineuse est réfléchie à l'intérieur du cristal : c'est la réflexion interne totale.

La condition pour qu'il y ait réflexion totale est [107,111] :

$$\Theta_i \geq \theta_c \qquad \text{avec} \qquad \theta c = \sin^{-1}(n_c/n_s)$$

Ce processus génère une onde évanescente, un champ électromagnétique qui pénètre légèrement dans l'échantillon sur une faible profondeur. Cette onde interagit avec l'échantillon, permettant d'absorber certaines longueurs d'onde infrarouges et ainsi d'analyser sa

composition. La profondeur de pénétration de l'onde évanescente est influencée par les indices de réfraction **(n_c, n_s)**, la longueur d'onde du faisceau infrarouge, et l'angle d'incidence **Θ_i**

Le faisceau infrarouge, après réflexion à l'interface échantillon-cristal, est capté par le détecteur.

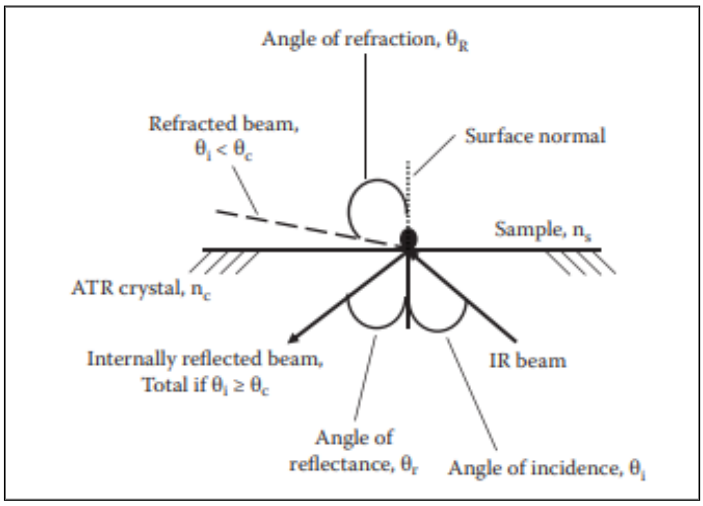


Figure 18 : Schéma du principe de la réflexion interne totale en mode ATR [111].

Grâce à cette technique, il est possible d'enregistrer rapidement des spectres d'échantillons solides ou pâteux sans nécessiter une préparation complexe, ce qui en fait une méthode particulièrement pratique pour des analyses directes [112].

La réflexion est dite atténuée, car l'intensité du faisceau réfléchi est diminuée par l'absorption de l'échantillon : d'où le nom ATR (Attenuated Total Reflectance) [113].

Dans la pratique, tout échantillon mis en contact avec l'onde évanescente peut être analysé par ATR. Pour les solides, polymères ou poudres**,** il est recommandé d'appliquer une pression à l'aide d'un serre-échantillon pour assurer un bon contact (fig 19) [111].

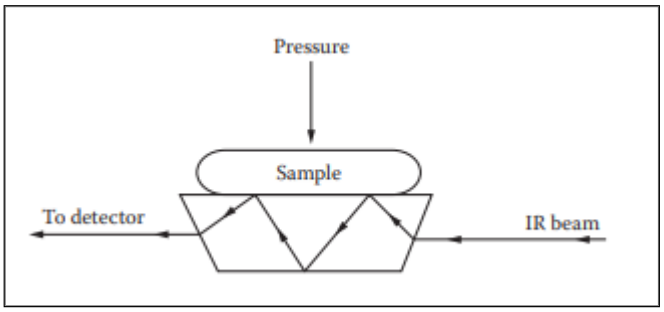


Figure 19 : Illustration du chemin optique total [111].

En ATR, la **profondeur de pénétration (DP)** correspond à la distance à laquelle l'intensité de l'onde évanescente chute à 36,8 % de sa valeur initiale (soit 1/e). Cette onde pénètre faiblement dans l'échantillon, ce qui conditionne la zone analysée en surface.

Elle est donnée par la formule suivante [110] [111] :

$$\mathbf{DP = 1/2\pi\ W\ n_c\ \sqrt{sin2\ \theta\ -\ nsc2}}$$

Avec :

- **DP** : profondeur de pénétration (en cm) ;
- **W** : nombre d'onde (cm^{-1}) ;
- **nc** : indice de réfraction du cristal ATR ;
- **θ** : angle d'incidence ;
- $\mathbf{n_{sc}}$: rapport des indices de réfraction échantillon/cristal.

Pour obtenir la DP en **microns**, on multiplie le résultat par 10^4.

- **Influence des paramètres sur la DP**

Comme tous les paramètres sont au dénominateur, une augmentation de l'un d'eux diminue la profondeur de pénétration.

- **Nombre d'onde (W)** : plus le nombre d'onde est élevé, plus la DP est faible ; → La lumière à 1000 cm^{-1} pénètre 3x plus que celle à 3000 cm^{-1} ;
- **Angle d'incidence (θ)** : plus il est grand, plus la DP diminue ;
- **Indice du cristal (nc)** : plus il est élevé, plus la DP est faible ;
- **Rapport n_{sc} (n_échantillon / n_cristal)** : plus il augmente, plus la DP diminue.

- **Conséquences spectrales**

- En spectres ATR, les bandes à basse fréquence (ex. : 1000 cm^{-1}) sont plus intenses que celles à haute fréquence (ex. : 3300 cm^{-1}), contrairement aux spectres de transmission ou DRIFTS où l'intensité reste constante ;
- Cela entraîne des différences d'intensité relative entre spectres ATR et non-ATR, même si les positions des pics restent similaires ;
- Un léger décalage des bandes spectrales par rapport au spectre de transmission équivalent [110]

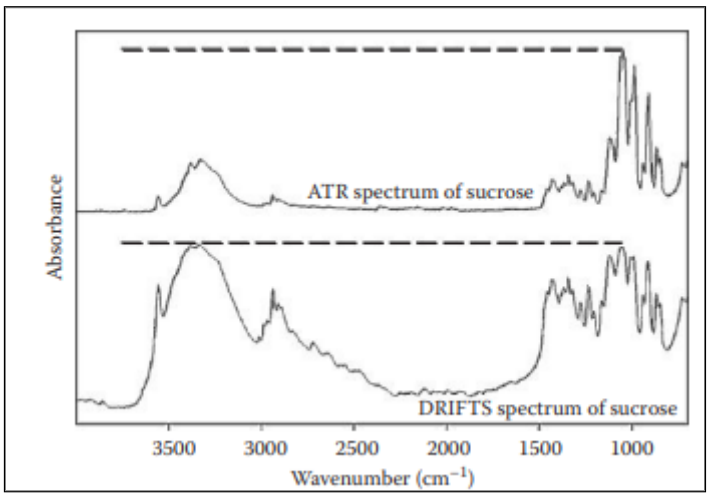


Figure 20: Bas : Spectre DRIFTS du saccharose (sucre de table). La ligne en pointillés montre que les pics aux nombres d'onde élevés et faibles ont à peu près la même intensité.
Haut : Spectre ATR du saccharose. La ligne en pointillés montre que les pics aux nombres d'onde élevés sont moins intenses que ceux aux nombres d'onde faibles [105].

- **Comparaisons spectrales et bibliothèques**

- Il est préférable de comparer des spectres ATR entre eux uniquement ;
- Comparer un spectre ATR à une base non-ATR mène à des erreurs d'identification ;
- Certaines solutions logicielles proposent une "correction ATR", ajustant artificiellement les intensités pour ressembler à un spectre de transmission.

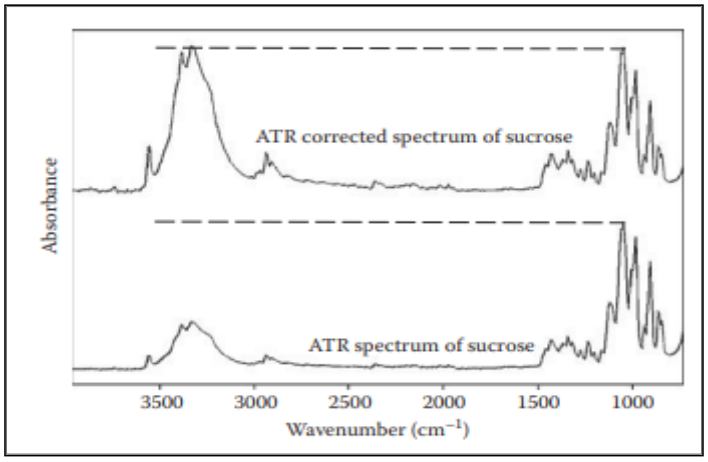


Figure 21 : Spectre ATR avant (en bas) et après (en haut) correction [111]

3.2.4 Appareillage

Les spectrophotomètres utilisés pour l'enregistrement des spectres infrarouges sont composés d'une source lumineuse adaptée, d'un interféromètre, d'un système de présentation de l'échantillon et d'un détecteur. Les spectrophotomètres infrarouges à transformée de Fourier

(FTIR) exploitent un interféromètre pour calculer le spectre à partir des données obtenues par transformée de Fourier.

La technique de réflexion totale atténuée (ATR) repose sur un dispositif spécifique, à réflexion unique ou multiple, intégré à l'appareil.

Les cristaux ATR ont des indices de réfraction différents, influençant directement la profondeur de pénétration [111].

Tableau 15 . Différents types de Cristaux ATR *[111]*.

Élément de réflexion interne (ERI) ou élément réflecteur	Intervalle des nombres d'onde (cm^{-1})	Indice de réfraction	Caractéristique
Germanium	5000 – 850	4,0	Dur et cassant Sensible à la température.
Bromo-iodure de thallium (KRS-5)	5000 – 275	2,38	Matériau ATR conventionnel Insoluble dans l'eau. Relativement doux – déforme – toxique. Réagit avec les agents complexants.
Séléniure de Zinc (ZnSe)	5000 – 550	2,41	Insoluble dans l'eau Dur et cassant Attaqué par des acides et des alcalins forts.
Diamant	4500 – 2500 1800 – 200	2,4	Très dur - inerte Souvent utilisé comme film protecteur pour les éléments ATR tels que ZnSe
Silicon	8300 – 1500	3,4	Gamme de longueur d'onde limitée. Dur et cassant – Inerte

3.2.5 Applications de la spectrométrie dans l'IR moyen

Dans le domaine pharmaceutique, la spectroscopie infrarouge moyen (IR) trouve de nombreuses applications, aussi bien en analyse qualitative que quantitative. Conformément aux recommandations de la Pharmacopée Européenne 9.0, ses principaux domaines d'application sont les suivants [107] :

3.2.5.a Applications en analyse qualitative

- Identification des principes actifs, des excipients, des formes pharmaceutiques, des intermédiaires de synthèse, des produits chimiques et des matériaux d'emballage;
- Évaluation qualitative de ces mêmes composants, notamment pour la comparaison des spectres entre différents lots ou en cas de changement de fournisseur;
- Étude de l'état solide, en particulier pour l'analyse du polymorphisme;
- Suivi des réactions chimiques au cours des procédés de synthèse.

3.2.5.b Applications en analyse quantitative

- Quantification des substances actives;
- Détermination de la concentration en impuretés, notamment dans les gaz ou les composés inorganiques;
- Mesure de la teneur en eau et de la teneur en solvants.

3.2.6 Avantages

Elle semble être la technique de choix [115]. Cette technique présente de nombreux avantages :

- Contrairement aux méthodes chimiques, elle caractérise des molécules et des ions séparément permettant ainsi de conclure avec certitude à la présence d'une substance donnée, minérale ou organique, quel que soit son état, cristallisé ou amorphe;
- Analyse rapide, elle permet d'enregistrer un spectre en 10-15 seconde ce qui est avantageux en analyse de routine en milieu hospitalier;
- Sa mise en œuvre nécessite une faible quantité de matière (1 à 2 mg), ce qui s'avère particulièrement avantageux pour l'examen de très petits calculs ou de minuscules zones d'une lithiase hétérogène ;
- Préparation simple de l'échantillon, aucun mélange à d'autres substances;
- Méthode non destructive : le calcul reste globalement intact, avec une récupération possible de l'échantillon;
- Elle nécessite un nettoyage simple et rapide de l'accessoire;
- Base de données spectrale étendue : Permet de comparer les spectres obtenus à des bibliothèques de référence, facilitant l'identification;

- Spectres reproductibles : identification fiable via des bases de données;
- Elle permet de faire une bonne estimation quantitative de divers constituants;
- Identification de composés cristallins et amorphes : La SPIR détecte aussi bien les formes cristallisées que les formes amorphes des substances présentes;
- Reconnaissance de mélanges complexes : Permet de détecter des compositions mixtes et de quantifier approximativement les différents constituant, quels que soit leur nature chimique ou leur état cristallin;
- Distingue les artéfacts et les constituants rares, avec haute précision (98-99 %) [116] .

3.2.7 Limitations

- Le prix de l'accessoire ATR;
- L'analyse des mélanges particuliers peut soulever quelques difficultés sur le plan qualitatif et par conséquent sur le plan quantitatif. L'utilisation de très petites quantités de l'échantillon risque de poser des problèmes si l'échantillon est hétérogène;
- Moins sensible pour les constituants mineurs (< 5%) ; Les substances en très faible proportion peuvent passer inaperçues dans le spectre global (risquent d'être masqués par les bandes spectrales dominantes du composé majoritaire) ;
- Limité à la surface ou à la zone échantillonnée : Le spectre obtenu ne représente que la zone analysée, donc un calcul hétérogène peut nécessiter plusieurs analyses;
- Nécessite un opérateur expérimenté : L'interprétation des spectres peut être complexe sans formation spécifique, surtout en cas de spectres atypiques ou bruités;
- Analyse parfois difficile pour les mélanges complexes : Les pics superposés dans les mélanges ternaires rendent parfois l'interprétation délicate;
- Fiabilité affectée par : - la résolution de l'appareil - la reproductibilité des spectres;
- Précision dépend de la qualité de la banque de spectres.

3.3 Analyses thermiques

L'analyse thermique regroupe un ensemble de techniques permettant d'étudier les propriétés physiques et chimiques d'un matériau en fonction de la température, sous une atmosphère contrôlée [117,118].

Les grandeurs analysables par analyse thermique sont soit les variations des variables d'état de l'échantillon (par exemple, température, masse, volume, etc.) utilisées pour déterminer les propriétés du procédé ou du matériau (par exemple, chaleur de transition, capacité thermique, expansivité thermique, etc.), soit les variations des propriétés du matériau de l'échantillon (par

exemple, composition chimique, forces interatomiques, structure cristalline, etc.). Ces variations se produisent à température constante ou variable de l'échantillon, généralement de manière programmée [117].

Elles sont particulièrement utiles pour caractériser les matériaux solides, qu'ils soient organiques, inorganiques ou mixtes. Dans le contexte de l'étude des lithiases urinaires, les méthodes d'analyse thermique permettent d'identifier certaines phases cristallines, d'étudier leur stabilité thermique, leur état d'hydratation et de détecter la présence de composés organiques [118].

Parmi les techniques existantes, deux ont été retenues dans cette étude [119,120] :

- **L'analyse thermogravimétrique (TG** ou **ATG)**, qui enregistre les pertes de masse du matériau en fonction de la température,
- **La calorimétrie différentielle à balayage (DSC)**, qui mesure les échanges de chaleur associés à des transformations physiques ou chimiques.

3.3.1 Analyse thermogravimétrique (ATG)

3.3.1.a Principe

L'analyse thermogravimétrique (ATG) ou bien thermogravimétrie (TG) est une technique d'analyse thermique qui permet de mesurer la variation de masse d'un échantillon en fonction du temps ou de la température, sous atmosphère contrôlée (air, azote, argon, etc.) [121,122].
L'échantillon est soumis à un programme de température linéairement croissante, généralement à une vitesse de quelques °C/min. Une courbe de type « perte de masse (%) en fonction de la température (°C) » est obtenue «TG » [123]. Chaque palier ou décroissance de la masse observée peut être interprété comme un événement thermique correspondant à :

- La perte d'eau libre ou d'hydratation;
- La décomposition d'une phase organique ou inorganique;
- Une réaction chimique (oxydation, réduction, etc.) [124,125].

La dérivée de cette courbe, appelée courbe DTG (Dérivée Thermogravimétrique), met en évidence les vitesses de variation de masse. Elle permet notamment de séparer des phénomènes thermiques proches en température, ou d'identifier des réactions lentes suivies de réactions plus rapides. La ligne de base de la DTG revient naturellement à zéro une fois le processus terminé, la pente devenant alors nulle [122,125].
Ce principe permet d'identifier les composés volatils, estimer leur proportion, et caractériser des transitions thermiques spécifiques.

Dans le cas des calculs urinaires, l'ATG permet par exemple de distinguer les phases anhydres des phases hydratées, ou encore de détecter une teneur en matière organique [126,127]. L'analyse est généralement réalisée sous atmosphère d'air ou d'azote, selon que l'on souhaite favoriser ou non les phénomènes d'oxydation [122,128].

3.3.1.b Appareillage

L'appareil utilisé, appelé thermobalance, est constitué d'un four associé à une microbalance de haute précision, permettant d'enregistrer les moindres pertes ou gains de masse pendant l'analyse. Elle constitue l'organe le plus sensible [122].

Une estimation de la précision des thermobalances actuelles est donnée par les chiffres suivants : 10 mg de prise d'essai peuvent être pesés avec précision de 0.1 % dans une manipulation typique.

L'appareil comprend généralement [122]

- **Une microbalance de haute précision**, capable de détecter des variations de masse de l'ordre du microgramme (0.3 à 150 µg);
- **Un four programmable**, permettant d'appliquer un profil thermique défini (chauffage linéaire, palier isotherme, refroidissement contrôlé, etc.) sur une large gamme de températures (généralement de la température ambiante à 1620 °C ou plus) [129];
- **Un système d'introduction de gaz**, assurant une atmosphère contrôlée autour de l'échantillon (air, azote, hélium, argon, oxygène…), essentielle pour simuler des conditions oxydantes, inertes ou réductrices [122,129];
- D'un thermocouple placé à proximité immédiate de l'échantillon, assurant une mesure précise et continue de la température appliquée tout au long de l'analyse [129];
- **Un système d'acquisition de données**, pour enregistrer en continu la masse, la température et le débit de gaz, et pour générer les courbes TG et DTG.

La relation entre les composants d'une thermobalance varie d'un instrument à l'autre [129]. Une représentation schématique, comme illustrée dans les figures 22-23, montre les positionnements typiques des thermocouples par rapport à l'échantillon. Les trois positions standard de l'échantillon par rapport à la balance sont représentées dans la figure 22.

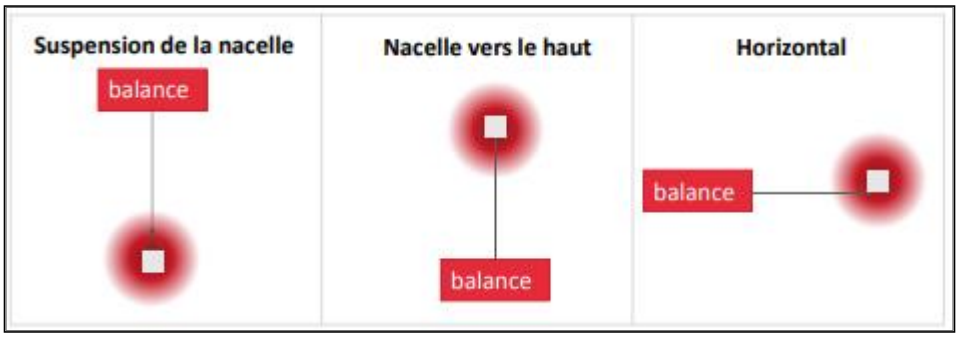


Figure 22 : Emplacement typique des thermocouples[131]

La figure 23 présente un schéma général des exemples concrets d'instruments commerciaux actuellement disponibles selon le positionnement du portes échantillons.

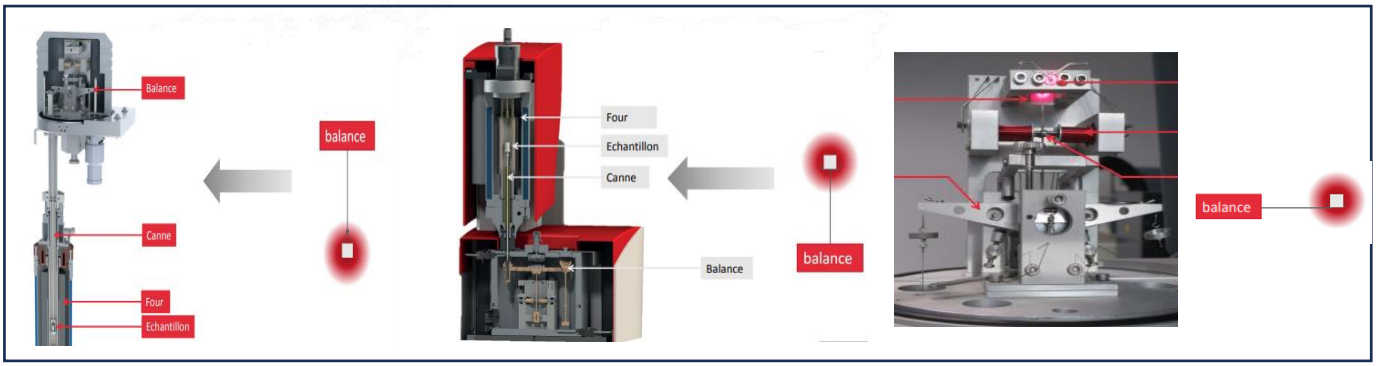


Figure 23 : Trois exemples de thermobalances commerciales, incluant le placement typique des thermocouples [131]

3.3.1.c Applications de l'ATG et interprétation des thermogrammes

L'analyse thermogravimétrique (ATG) permet d'étudier les phénomènes thermiques associés à des variations de masse d'un échantillon soumis à une élévation contrôlée de température. Cette technique est particulièrement adaptée pour détecter des processus tels que l'évaporation, la désolvatation, la sublimation, l'oxydation ou encore la dessiccation [122]. En revanche, certains phénomènes comme la fusion ou la cristallisation ne provoquant pas de perte de masse directe, ils ne sont pas détectés par l'ATG, sauf si ces transitions s'accompagnent de transformations secondaires (décomposition ou vaporisation) [121,123,130,131].

- **Représentation des thermogrammes**

Les courbes ATG, souvent distinctives, permettent d'identifier les processus thermiques associés (figure 24). Elles traduisent les variations de masse en fonction de la température, offrant des indices sur la nature des transformations subies par l'échantillon [120,122,132].

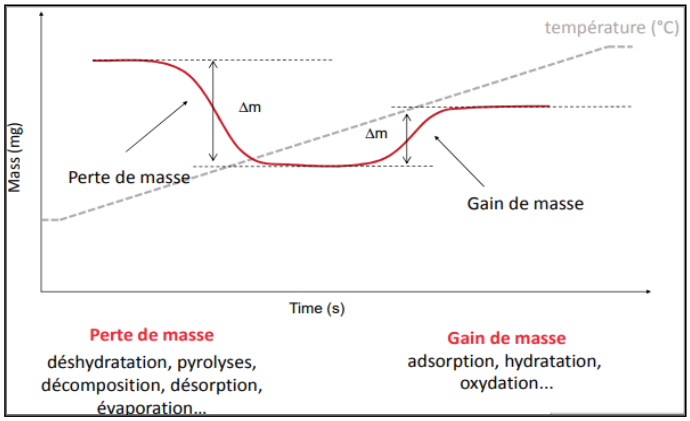


Figure 24 : Allures possibles d'un thermogramme [131]

- **Analyse de l'hydratation**

L'ATG est particulièrement utile pour évaluer l'état d'hydratation d'un matériau. La température à laquelle l'échantillon perd de l'eau dépend de la nature des liaisons :

- L'eau **faiblement liée** (ex. eau adsorbée) s'élimine dès les premières élévations de température.
- L'eau **fortement liée** dans des structures hydratées est libérée à des températures plus élevées, traduisant une stabilité accrue de l'hydrate [125] .

- **Observation de la fusion**

Théoriquement, la fusion n'induit pas de variation de masse. Toutefois, dans certains cas, elle peut être visible sur les thermogrammes lorsqu'elle s'accompagne :

- D'une vaporisation accrue du matériau fondu,
- Ou d'une décomposition thermique rapide en phase liquide, entraînant une perte de masse mesurable (Figure 25) [125].

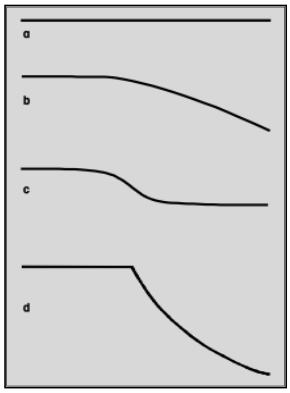


Figure 25 : différentes allures que peut prendre un thermogramme lors de la fusion (103).

- **Courbe a** : La fusion de l'échantillon s'effectue sans aucune variation de masse mesurable ;
- **Courbe b** : L'échantillon, une fois fondu, entre en phase de volatilisation, entraînant une perte de masse liée à son évaporation ;
- **Courbe c** : La perte de masse observée correspond à l'élimination de l'eau adsorbée en surface ;
- **Courbe d** : La fusion est accompagnée d'une décomposition thermique de l'échantillon, se traduisant par une perte de masse significative.

3.3.1.d Avantages de l'ATG dans l'analyse des lithiases urinaires

- **Détermination de la composition hydratée** : L'ATG permet d'identifier la présence et la quantité d'eau dans les calculs urinaires (hydrates, oxalates, phosphates hydratés);
- **Analyse des étapes de décomposition thermique** : Permet de différencier les phases minérales des phases organiques en fonction de leur stabilité thermique;
- **Identification des composants thermosensibles** : Certains constituants organiques (protéines, acides uriques) peuvent être détectés grâce à leur dégradation spécifique;
- **Méthode complémentaire** : En couplage avec la DSC ou la spectroscopie infrarouge, l'ATG permet d'améliorer l'identification des constituants des lithiases;
- **Analyse en atmosphère contrôlée** : La possibilité d'effectuer des analyses sous différentes atmosphères (air, azote, oxygène) permet d'étudier les réactions d'oxydation ou de pyrolyse [117] [122].

3.3.1.e Limites de l'ATG dans l'analyse des lithiases urinaires

- **Absence d'identification chimique précise** : L'ATG indique les pertes de masse mais ne permet pas d'identifier directement les composés évaporés ou dégradés;
- **Influence des conditions expérimentales** : La vitesse de chauffage, la masse d'échantillon et l'atmosphère d'analyse peuvent modifier les résultats et rendre l'interprétation complexe;
- **Superposition des pertes de masse** : Certains composants peuvent se décomposer dans les mêmes plages de température, rendant difficile leur distinction;
- **Limitation sur les composants inorganiques stables** : Certains minéraux comme l'apatite sont thermiquement très stables et ne subissent pas de perte de masse significative, limitant leur détection par ATG;
- **Nécessité de couplage avec d'autres techniques** : L'ATG seule ne suffit pas pour identifier précisément tous les constituants et doit être associée à la spectroscopie infrarouge ou à la diffraction des rayons X [119,122].

3.3.2 Calorimétrique différentielle à balayage

3.3.2.a Principe

La Calorimétrie Différentielle à Balayage (CDB) Ou bien l'**Analyse Calorimétrique Différentielle (ACD)** est une méthode qui permet d'étudier les phénomènes énergétiques se produisant lors du chauffage ou du refroidissement d'une substance (ou d'un mélange de substances). Elle permet de déterminer les variations d'enthalpie, les changements de chaleur spécifique et les températures auxquelles ces transformations se manifestent [122,133–135].

Cette technique mesure le flux de chaleur différentiel (par rapport à la température), émis ou absorbé par l'échantillon analysé, en comparaison avec une cellule de référence, en fonction de la température [120,133,135].

Il existe trois types d'ACD :

1. L'ACD à compensation de puissance;
2. L'ACD flux métrique à capteur plan;
3. L'ACD flux métrique à capteur enveloppant [134].

Au sein de notre laboratoire, nous employons un calorimètre ACD à capteur plan de type fluxmétrique, dont le principe de fonctionnement s'apparente à celui d'un dispositif classique d'Analyse Thermique Différentielle (ATD) [134].

Le flux thermique (φ) est déterminé en évaluant l'écart de température entre l'échantillon et un matériau de référence. Cette mesure, qui repose sur la technologie de l'instrument, est exprimée en Joules (J) ou en Watts (W) selon le système international des unités [134–136].

La mesure de la température s'effectue au niveau de la plaque supportant les creusets, à l'aide de thermocouples intégrés [134].

3.3.2.b Appareillage pour DSC

La figure 26 illustre le schéma d'un calorimètre DSC à flux thermique équipé d'un capteur plan.

La tête de mesure, élément central de l'appareil, est conçue de manière simplifiée comme suit [136]:

- Une chambre E, où la température TE, maintenue aussi uniforme que possible, peut être programmée pour varier (augmentation, diminution, maintien constant ou modulation).
- Un creuset, ouvert ou fermé selon les besoins, contient l'échantillon à analyser. Un autre creuset de référence ; il est généralement vide, mais peut contenir un matériau inerte sur le plan thermique dans la plage de températures étudiée.
- Un système de mesure (thermocouple, résistance de platine, etc.) enregistre les températures Te (échantillon) et Tr (référence), ou leur écart, en fonction du temps ou en fonction de la température du four.
- Pour garantir des résultats précis, l'ensemble du dispositif doit être parfaitement symétrique, assurant ainsi que l'échantillon et la référence absorbent la même quantité d'énergie thermique [131,135,136].

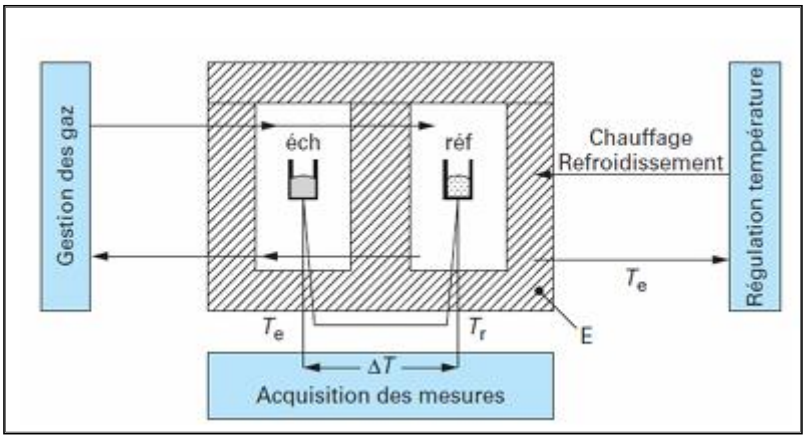


Figure 26 : Schéma d'un calorimètre DSC *[136]*

Un changement au sein de l'échantillon produit un échange de chaleur avec son environnement et une variation de sa température

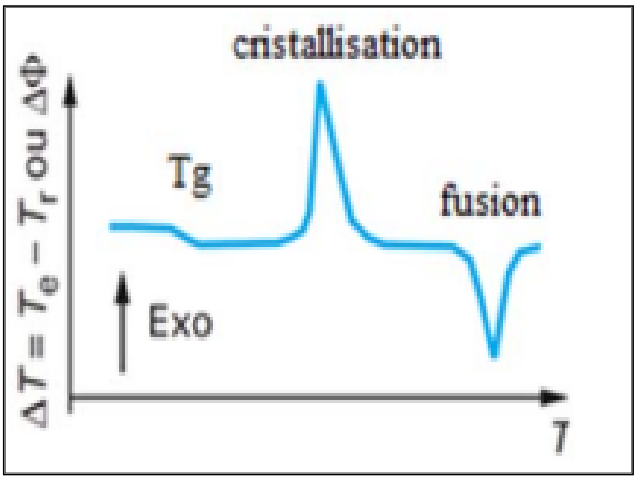


Figure 28 : Allure d'un thermogramme [130]

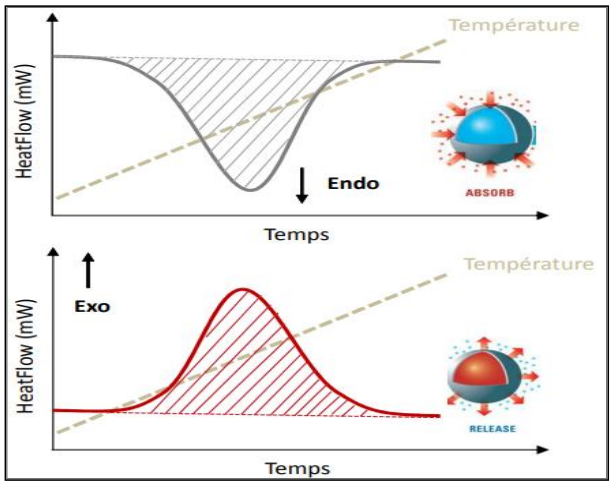


Figure 27 : Les phénomènes thermiques observés[131]

Dans ce thermogramme, où un flux thermique positif indique une réaction exothermique, trois catégories de phénomènes thermiques peuvent être identifiées :

- Une transition de second ordre, associée à la température de transition vitreuse (Tg) ;
- Un phénomène endothermique, caractérisé par l'absorption de chaleur par l'échantillon, entraînant un ΔT négatif. Exemples : fusion, gélatinisation, dénaturation ou évaporation ;
- Un phénomène exothermique, marqué par une libération de chaleur par l'échantillon, avec un ΔT positif. Exemples : cristallisation, décomposition, réactions chimiques, oxydation ou polymérisation, mouillage [131,136].

3.3.2.c Analyse par technique couplée DSC-ATG

Parmi les approches combinées les plus courantes, l'association de la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) avec l'analyse thermogravimétrique (ATG), en particulier via le signal dérivé DTG, permet d'examiner simultanément les phénomènes thermiques et les variations de masse d'un échantillon placé dans des conditions identiques (température, atmosphère, etc.). De nombreux fabricants proposent des équipements conçus à cet effet [136] .

Les graphiques générés combinent les données des courbes de calorimétrie différentielle à balayage (DSC), d'analyse thermogravimétrique (ATG) et de la dérivée thermogravimétrique (DTG), comme illustré dans le schéma correspondant (figure 29).

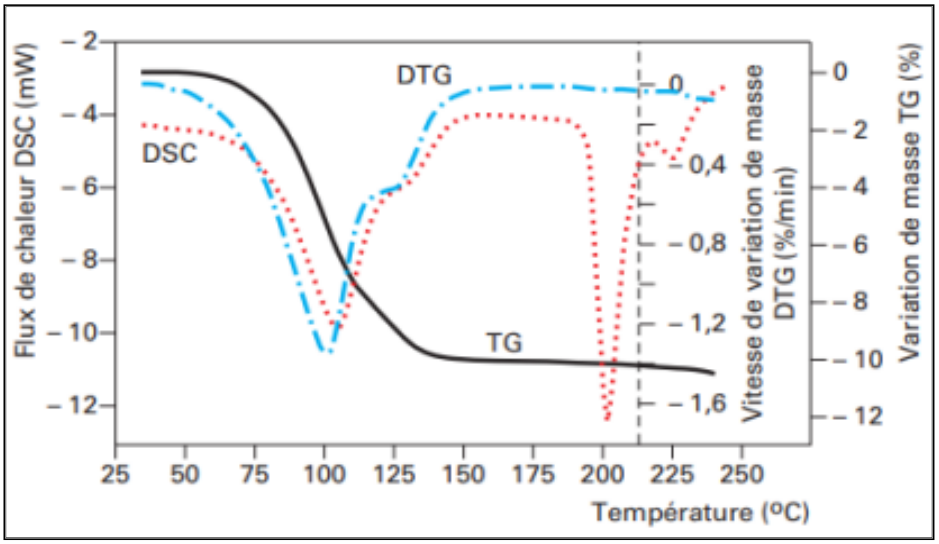


Figure 29 : Déshydratation et fusion d'un sel dihydraté mises en évidence par DSC-ATG couplées [130].

3.3.2.d Applications de la DSC (Analyse Calorimétrique Différentielle à Balayage)

La DSC est une technique clé pour l'étude des propriétés thermiques des matériaux dans plusieurs domaines [133] :

- **Chimie et matériaux** : Détermination des températures de fusion, transition vitreuse et cristallisation ; analyse de la stabilité thermique et des réactions thermiques;
- **Pharmacie et biologie** : Évaluation de la stabilité des médicaments, des interactions médicament-excipient et des changements de phase;
- **Industrie alimentaire** : Étude des graisses, protéines, sucres et processus de vieillissement des aliments ;
- **Géologie et minéralogie** : Identification des minéraux, des réactions de déshydratation et de la composition des carbonates et sulfates;

- **Lithiases urinaires** : Identification des constituants des calculs, étude des phases hydratées et analyse couplée avec l'ATG;
- **Polymères et plastiques** : Contrôle qualité, cristallinité des polymères et effets du vieillissement thermique [122,129,133,136,137].

3.3.2.e Avantages

- **Identification des constituants** : Permet de déterminer les températures de fusion et de décomposition des composants des lithiases urinaires;
- **Analyse des phases hydratées** : Détecte la présence d'eau dans les calculs en observant les transitions thermiques;
- **Technique rapide et sensible** : Fournit des résultats précis avec une faible quantité d'échantillon;
- **Couplage avec l'ATG** : Complète l'analyse en corrélant la perte de masse avec les événements thermiques;
- **Étude de la stabilité thermique** : Permet d'évaluer la stabilité des constituants sous différentes conditions de température [122].

3.3.2.f Limites

- **Absence d'identification chimique précise** : La DSC ne permet pas à elle seule d'identifier avec certitude la nature chimique des composants;
- **Influence des impuretés** : La présence d'autres substances peut modifier les températures de fusion et fausser l'interprétation des résultats;
- **Interprétation parfois complexe** : Les transitions thermiques peuvent se chevaucher, rendant l'analyse plus difficile;
- **Nécessité de techniques complémentaires** : La spectroscopie infrarouge ou la diffraction des rayons X sont souvent nécessaires pour une identification complète [122,133].

CHAPITRE III

Chimiométrie

1 Fondements de la chimiométrie

1.1 Introduction

La chimiométrie est une discipline interdisciplinaire, située à l'interface de la chimie, des mathématiques et de l'informatique, qui vise à extraire un maximum d'informations utiles à partir de données expérimentales complexes [138,139]. Elle s'avère particulièrement pertinente en sciences analytiques, notamment lorsqu'il s'agit d'exploiter des ensembles de mesures massives et parfois redondantes, comme celles produites par la spectroscopie infrarouge (IRTF) [140–143].

Dans le contexte du diagnostic des lithiases urinaires, elle joue un rôle crucial en intégrant des données hétérogènes : spectres IR, informations morphologiques des calculs, variables biologiques et cliniques des patients (sexe, IMC, paramètres biochimiques, etc.) [144,145] Elle permet non seulement d'identifier les composants minéraux des calculs (oxalates, phosphates, acide urique, etc.), mais aussi d'en analyser les facteurs de formation, contribuant ainsi à une meilleure compréhension physiopathologique et à une prise en charge individualisée [146,147].

La chimiométrie permet de surmonter les défis posés par la complexité des données chimiques [148,149], notamment la multicolinéarité des spectres IR [150], où les variables (nombres d'onde) sont fortement corrélées, ainsi que l'hétérogénéité des données cliniques, qui incluent des variables binaires (ex. sexe), nominales (ex. type de lithiase) et quantitatives (ex. pH urinaire) . À travers l'application de méthodes exploratoires de régression et connexionnistes, elle facilite l'interprétation des données, permet de regrouper les échantillons selon leurs similarités, d'identifier les facteurs discriminants et de construire des modèles prédictifs robustes [151], visant à relier les caractéristiques physico-chimiques des calculs à des facteurs étiologiques ou à des profils patients [152,153].

Ce chapitre expose les fondements conceptuels des approches chimiométriques en mettant l'accent sur leur application au diagnostic des lithiases urinaires, tout en posant le cadre pour les analyses pratiques réalisées, incluant des méthodes comme la régression PLS, SVR, et la sélection de variables [154].

1.2 Définitions

La chimiométrie est définie comme l'application de méthodes statistiques et mathématiques à l'analyse des données chimiques [155,156], dans le but d'extraire des informations pertinentes et de faciliter la prise de décision [157,158]. Elle vise à transformer des ensembles de données complexes, souvent de grande dimension, en connaissances exploitables [157,159], par

exemple pour identifier la composition chimique des lithiases urinaires ou prédire certaines propriétés cliniques à partir de spectres IR.

Elle se distingue par son approche multivariée, qui prend en compte les interactions entre variables, contrairement aux analyses univariées traditionnelles. Elle est particulièrement adaptée aux données complexes où les variables sont interdépendantes, comme dans les spectres IR, où les longueurs d'onde présentent une forte multicolinéarité [160–162] .

Dans ce cadre, plusieurs concepts fondamentaux sont à connaître :

- **Variable explicative (ou indépendante)** : c'est une caractéristique mesurée ou observée qui est supposée influencer ou expliquer un phénomène [141] . Dans le contexte des lithiases, il peut s'agir de nombres d'onde IR, du sexe du patient, de son IMC ou encore du pH urinaire;
- **Variable réponse (ou dépendante)** : il s'agit du résultat à expliquer ou à prédire [141,163]. Cela peut correspondre, par exemple, au type de lithiase identifié (oxalate de calcium, acide urique, struvite…);
- **Modèle chimiométrique** : c'est une fonction mathématique construite pour relier les variables explicatives à la variable réponse. Ce modèle peut être de type exploratoire (comme l'analyse en composantes principales, ACP), prédictif (régression PLS, SVR) ou classificateur (CAH, k-médoïdes, SVM…) [138,141,164];
- **Multicolinéarité** : désigne une situation où plusieurs variables explicatives sont fortement corrélées entre elles, ce qui rend leur interprétation individuelle difficile sans recours à des techniques de réduction de dimension ou de régularisation [165–167] ;
- **Réduction de dimension** : ensemble de techniques visant à simplifier un jeu de données tout en conservant l'essentiel de son information (par exemple, l'ACP ou t-SNE) [150,168–171];
- **Surapprentissage (overfitting)** : phénomène où un modèle devient trop spécifique aux données d'entraînement, perdant ainsi sa capacité à généraliser à de nouveaux cas. C'est un enjeu majeur en chimiométrie, notamment lors de la modélisation prédictive [163,172].

Ces définitions posent les bases conceptuelles nécessaires à la compréhension des approches chimiométriques développées dans ce chapitre.

1.3 Contexte d'application : diagnostic des lithiases urinaires

L'intégration des données spectrales, morphologiques, cliniques et biologiques par des méthodes chimiométriques constitue une étape clé vers un diagnostic plus précis, plus rapide et

mieux personnalisé des lithiases urinaires [153,173,174]. Les approches multivariées, incluant l'apprentissage supervisé et non supervisé ainsi que les techniques de sélection de variables, permettent de modéliser les relations entre les caractéristiques physico-chimiques des calculs et les facteurs cliniques associés.

Cette stratégie analytique vise à identifier des profils discriminants pouvant contribuer à l'orientation diagnostique ou étiologique.

1.4 Classification des approches chimiométriques

Les approches chimiométriques peuvent être classées en plusieurs catégories selon l'objectif de l'analyse, la nature des données et le type d'apprentissage impliqué.

Cette classification permet de choisir les méthodes les plus appropriées en fonction du type de question posée (exploration, prédiction, classification), du format des variables (qualitatives, quantitatives) et du niveau d'interprétabilité recherché [139,175] .

On distingue ainsi deux grands types d'analyses :

1.4.1 Analyses qualitatives

Elles visent à explorer la structure des données, à mettre en évidence des organisations sous-jacentes, ou à regrouper les échantillons en classes homogènes, sans prédiction numérique. Ces approches sont typiquement utilisées en phase exploratoire pour dégager des tendances, détecter des valeurs aberrantes (outliers), ou proposer une typologie des calculs [175].

1.4.2 Analyses quantitatives

Elles cherchent à prédire des variables réponses (quantitatives ou catégorielles), telles que la concentration d'un composé ou le type de lithiase, à partir d'un ensemble de variables explicatives comme les spectres infrarouges ou les données cliniques. Ces méthodes reposent sur des modèles mathématiques ajustés sur des données d'apprentissage, et sont évaluées sur leur capacité de généralisation [175].

Pour une analyse plus fine, les approches chimiométriques peuvent être regroupées en trois grandes classes fonctionnelles [176]:

1.4.3 Méthodes exploratoires (non supervisées)

Ces méthodes, telles que l'Analyse en Composantes Principales (ACP), les analyses bivariées (corrélation), ou la Résolution Multivariée de Courbes (MCR), permettent d'examiner la structure intrinsèque des données sans connaissance préalable des classes ou des valeurs cibles.

Elles visent à réduire la dimensionnalité, visualiser les regroupements, ou orienter la sélection de variables pertinentes [168,171,177] .

Par exemple, l'ACP peut révéler des différences spectrales entre lithiases d'oxalate et d'acide urique, tandis que les analyses bivariées explorent les associations entre variables elles-mêmes [145].

1.4.4 Méthodes de régression supervisée

Ces approches comprennent la régression linéaire multiple (MLR), la régression sur composantes principales (PCR), la régression des moindres carrés partiels (PLS), ou la régression Ridge. Elles modélisent les relations entre un ensemble de variables explicatives (spectres IR, données cliniques) et une variable cible (type de lithiase, concentration d'oxalate, etc.) [177,178] . Elles sont essentielles pour quantifier les composés présents dans les lithiases à partir de variables complexes [152].

1.4.5 Méthodes connexionnistes ou algorithmes à noyaux

Issues de l'intelligence artificielle, ces méthodes incluent les Support Vector Regression (SVR), les Support Vector Machines (SVM), ou les réseaux de neurones [139,163]. Elles permettent de capturer des relations non linéaires complexes entre les variables, et visent à optimiser la performance prédictive, notamment dans des contextes bruités ou de forte redondance des données.

Le SVR, par exemple, est bien adapté pour prédire les propriétés de lithiases à partir de spectres bruités ou de variables cliniques non linéaires [147] .

Dans le cadre de cette étude, l'accent est mis sur les méthodes quantitatives, notamment les approches de régression (PLS, Ridge) et connexionnistes (SVR), pour prédire la composition des lithiases à partir des spectres infrarouges.

Une phase préalable d'exploration multivariée (analyses bivariées, ACP) reste néanmoins indispensable pour identifier les variables cliniques ou biologiques les plus pertinentes (ex. pH urinaire) et visualiser les structures spectrales.

Cette classification structurera les sections suivantes, en détaillant chaque catégorie et son application au diagnostic des lithiases urinaires.

1.5 Présentation des données

La chimiométrie repose sur l'analyse de jeux de données bien structurés, indispensables à l'application rigoureuse des méthodes exploratoires, de régression ou connexionnistes [176].

Dans le cadre du diagnostic des lithiases urinaires, deux grandes catégories de données sont exploitées : les données spectroscopiques infrarouges et les données cliniques, biologiques et morphologiques**.**

1.5.1 Données spectroscopiques

Les spectres infrarouges (IR) sont organisés sous forme d'une matrice de données X définie comme suit :

- **Lignes** : chaque ligne correspond à un échantillon analysé (lithiase urinaire);
- **Colonnes** : chaque colonne représente une variable spectrale « nombre d'onde » (ex. de 400 à 4000 cm^{-1});
- **Valeurs** : la transmittance mesurée à chaque nombre d'onde.

Cette matrice est souvent de très grande dimension (plusieurs milliers de variables) et caractérisée par une forte redondance ou multicolinéarité, car les longueurs d'onde adjacentes présentent des signaux très corrélés [138,175].

Dans une approche prédictive, une variable cible Y est associée à cette matrice X [138,177]. Elle peut correspondre à :

- Une propriété quantitative (ex. concentration en oxalate de calcium);
- Ou une classe qualitative (ex. type de calcul : oxalate, phosphate, urate).

Par exemple, l'utilisation de la régression PLS (Partial Least Squares) permet de modéliser la relation entre le spectre IR et la concentration en composés présents dans les calculs urinaires.

1.5.2 Données cliniques, biologiques et morphologiques

Ces données regroupent un ensemble de variables hétérogènes issues de l'observation clinique, des analyses biologiques, ou de la caractérisation morphologique macroscopique des lithiases. Elles sont organisées dans une matrice où :

- **Lignes** : chaque ligne représente un patient ou un échantillon;
- **Colonnes** : chaque colonne correspond à une variable.

On distingue plusieurs types de variables :

- **Binaires** : ex. sexe (homme/femme codé 0/1), antécédents de diabète (oui/non);
- **Nominales** : ex. type de lithiase (oxalate, phosphate, urate);
- **Quantitatives** : ex. pH urinaire, IMC, taux de créatinine, taille du calcul.

La figure 30 illustre l'organisation matricielle des données spectroscopiques et des données cliniques/biologiques (X), associées éventuellement à une variable cible (Y) [152,169].

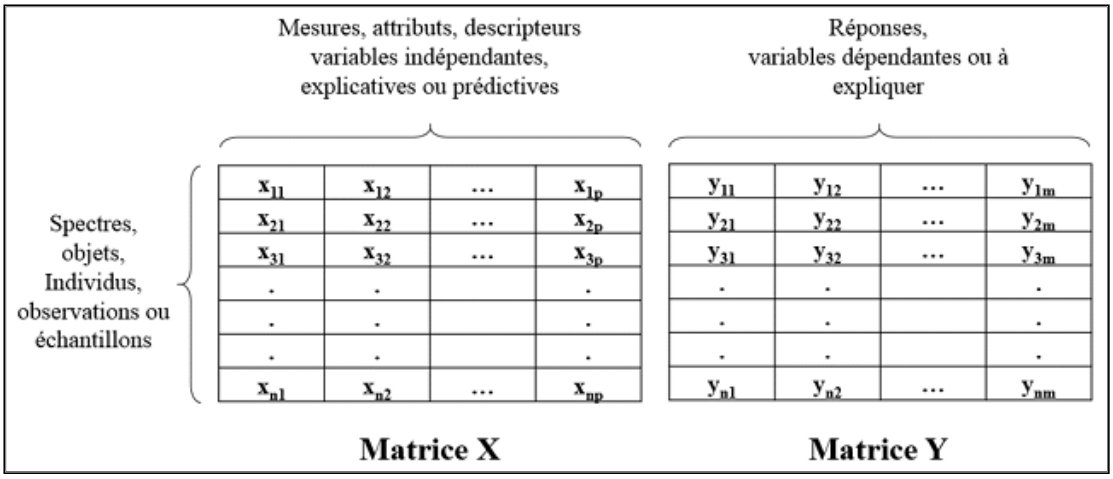


Figure 30 : Présentation des données *[175]*

2 Approches exploratoires

2.1 1. Principe

Les approches exploratoires constituent une étape fondamentale en chimiométrie. Elles permettent de mieux comprendre la structure des données avant d'appliquer des méthodes prédictives ou de classification [143]. Ces méthodes ont pour principaux objectifs [158] :

- La visualisation globale des relations entre les échantillons ou les variables;
- La détection de regroupements naturels ou d'outliers;
- La réduction de la dimensionnalité des données complexes, comme les spectres infrarouges ou les variables cliniques hétérogènes;
- Et la pré-identification de tendances ou d'associations pertinentes à approfondir par des analyses plus avancées.

Dans le contexte des lithiases urinaires, ces méthodes permettent de dresser une première cartographie des profils lithiasiques (par ex. distinction entre calculs phosphatés et oxaliques), ou de mettre en évidence des relations simples entre certaines caractéristiques cliniques (comme le pH urinaire) et le type de lithiase.

Ces analyses exploratoires s'appliquent aussi bien aux données spectroscopiques, très dimensionnelles et colinéaires, qu'aux données cliniques ou morphologiques, plus hétérogènes. Elles offrent une base indispensable à la structuration de modèles chimiométriques robustes, en orientant la sélection des variables pertinentes, le choix des prétraitements, ou encore le type de méthode statistique à appliquer [138].

2.2 Analyses bivariées

2.2.1 Principe

Les analyses bivariées consistent à étudier la relation entre deux variables à la fois, afin d'identifier des associations ou des différences significatives [179]. Ces méthodes sont particulièrement utiles dans un contexte médical pour explorer les liens entre des facteurs cliniques, biologiques ou morphologiques (ex. sexe, IMC, pH urinaire) et certaines caractéristiques lithiasiques (ex. type ou composition du calcul).

Selon la nature des variables comparées (binaires, nominales, ordinales, quantitatives), différents types de tests statistiques sont employés pour détecter des tendances, des corrélations ou des différences de répartition [168,179] .

2.3 Rôle dans le diagnostic

Dans l'étude des lithiases urinaires, les analyses bivariées permettent de mettre en évidence les facteurs susceptibles d'influencer la formation ou la composition des calculs. Par exemple, une association significative entre un pH urinaire bas et la présence de lithiases uriques oriente le diagnostic et la prise en charge du patient. Ces relations simples permettent également d'identifier des variables pertinentes à intégrer dans des modèles prédictifs plus complexes**.**

2.4 Types de tests

Selon la nature des données (binaires, nominales, quantitatives), plusieurs tests sont classiquement utilisés [168,180–182] :

- **Tests d'association pour variables qualitatives** (binaires ou nominales) :
  - Test du chi² pour évaluer l'indépendance entre deux variables nominales ou binaires comme l'indépendance entre le sexe et le type de lithiase;
  - Test exact de Fisher pour des effectifs faibles.
- **Tests de corrélation pour données quantitatives** :
  - Corrélation de Pearson pour variables quantitatives normalement distribuées;
  - Corrélation de Spearman pour des données non paramétriques ou ordinales.
- **Comparaisons de moyennes** : Pour comparer une variable quantitative (ex. pH urinaire) entre groupes définis par une variable binaire ou nominale (ex. types de lithiases).
  - Test t de Student ou ANOVA pour comparer des moyennes entre groupes ;
  - Test de Mann-Whitney ou Kruskal-Wallis en cas de non-normalité.

Ces tests sont détaillés dans la partie pratique, avec leur justification et leur application aux données réelles.

En chimiométrie, les analyses bivariées sont souvent un préalable aux méthodes multivariées, comme l'ACP ou la régression PLS, qui exploitent les relations complexes entre de multiples variables [179].

2.5 Limites

Les analyses bivariées ont l'avantage de la simplicité et de la lisibilité, mais présentent plusieurs limites [180] :

- Elles ne prennent pas en compte les interactions complexes entre variables multiples : un défi fréquent dans les données spectroscopiques et cliniques où la multicolinéarité et les effets croisés sont prédominants. Par exemple, une corrélation entre l'IMC et la taille des lithiases peut être influencée par d'autres facteurs, comme le pH urinaire, non pris en compte dans une analyse bivariée.
- Elles ne permettent pas d'expliquer la variabilité globale d'un phénomène multifactoriel, comme la lithogenèse.

Ces limites justifient le recours à des approches multivariées comme l'analyse en composantes principales (ACP) ou la régression PLS, pour une analyse plus approfondie [180].

2.6 Analyse en composantes principales (ACP)

2.6.1 Principe

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode multivariée non supervisée permettant de réduire la dimensionnalité d'un jeu de données tout en conservant un maximum d'information [175]. Elle consiste à transformer un ensemble de variables potentiellement corrélées (ex. intensités spectrales à différentes longueurs d'onde) en un nouvel ensemble de variables non corrélées appelées composantes principales (PC) [183]. Chaque composante représente une direction de variance maximale dans les données [166,171] .

Mathématiquement, pour une matrice de données (X) (échantillons × variables), l'ACP décompose (X) comme suit [138,175]:

$$[X = T P^T + E]$$

T : la matrice des scores (coordonnées des échantillons dans l'espace des composantes)

P : la matrice des loadings (poids des variables originales),

E : la matrice des résidus.

2.6.2 Application aux lithiases urinaires

Dans le cadre du diagnostic des lithiases urinaires, l'ACP est utilisée pour[141] :

- **Explorer les spectres infrarouges (IR)** : permettre la visualisation des regroupements entre types de calculs (ex. Oxalate de calcium vs phosphate) en projetant les spectres dans un espace à deux ou trois dimensions.
- **Étudier les données cliniques/biologiques/morphologiques** : détecter des profils de patients ou des associations entre variables.

Bien que son application soit plus courante sur les spectres en raison de leur haute dimensionnalité.

2.6.3 Prétraitements

Avant l'application de l'ACP, un prétraitement des données est indispensable pour garantir la comparabilité entre variables et limiter l'impact des variables fortement dominantes ou bruitées, Les prétraitements courants incluent [184] (Fig 31) :

- **Centrage** : soustraction de la moyenne de chaque variable pour centrer les données autour de zéro.
- **Réduction (normalisation)** : division par l'écart-type pour égaliser les variances (standardisation)

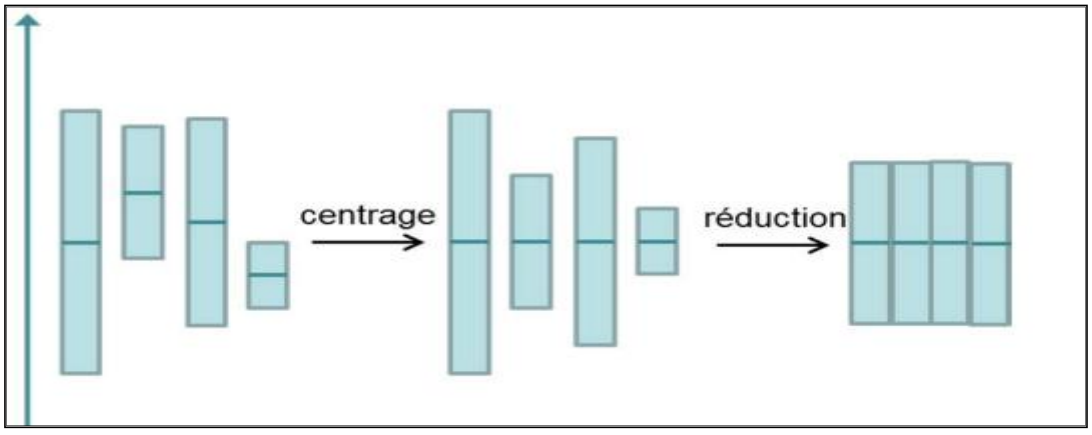


Figure 31 : Centrage par la moyenne suivi d'une réduction des variables [185]

- **Dérivation (1re ou 2e dérivée)** : Appliquée aux spectres IR afin de corriger les décalages de base ou les superpositions de pics.
- **Lissage** : Réduction du bruit spectral (ex. filtre Savitzky-Golay).

Ces étapes garantissent que l'ACP capture les variations chimiques pertinentes plutôt que les artefacts instrumentaux.

2.6.4 Interprétation

L'interprétation de l'ACP repose sur deux éléments principaux [175,185]:

- **Scores** : Représentent les coordonnées des échantillons dans le nouvel espace, défini par les composantes principales. Ils permettent de visualiser les regroupements, tendances ou anomalies (outliers) (ex. spectres atypiques).
- **Loadings (poids)** : Ils indiquent quels nombres d'onde (ou variables cliniques) contribuent le plus à la variance observée et aux différences entre groupes, Par exemple, un loading élevé à 1310 cm^{-1} sur PC1 suggère que ce nombre d'onde est discriminante pour les oxalates.

Cette double lecture (scores/loadings) permet une interprétation à la fois descriptive et biologique/chimique des résultats.

2.6.5 Limites

Bien que l'ACP soit puissante pour la visualisation et la détection de structures cachées, elle présente plusieurs limites [171] :

- Elle n'est pas prédictive, car elle ne relie pas directement les composantes à une variable cible (ex. concentration d'oxalate);
- Elle est sensible aux outliers, qui peuvent influencer fortement les premières composantes.
- L'interprétation des composantes peut être complexe si plusieurs variables contribuent simultanément à une composante, rendant difficile l'identification des facteurs chimiques sous-jacents.

Pour pallier ces limites, l'ACP est souvent combinée à d'autres méthodes (ex. PLS pour la régression, CAH pour le regroupement) dans les analyses chimiométriques complètes.

3 Modélisation par régression

3.1 Fondements de la modélisation par régression

La modélisation par régression vise à prédire une variable quantitative, comme la concentration d'un composé chimique (ex. oxalate de calcium) ou la taille d'une lithiase, à partir de données multivariées issues de spectres infrarouges (IR) ou de variables cliniques et biologiques [138]. Elle repose sur la construction d'un modèle mathématique reliant une ou plusieurs variables explicatives (X) à une variable réponse (Y) [169] . Dans le contexte des lithiases urinaires, ces approches permettent notamment d'estimer la proportion de composants chimiques dans un

calcul rénal à partir du spectre IR global, ou de prédire certains marqueurs pathologiques à partir de données cliniques.

Les méthodes de régression chimiométriques, telles que la régression linéaire multiple (MLR), la régression sur composantes principales (PCR), la régression des moindres carrés partiels (PLS), et la régression Ridge, sont conçues pour surmonter ces défis en [138,170]:

- **Réduisant la dimensionnalité** : En transformant les variables prédictives en un espace de moindre dimension (ex. composantes principales ou latentes).
- **Gérant la multicolinéarité** : En utilisant des techniques qui stabilisent les estimations face aux corrélations élevées.
- **Améliorant la robustesse** : En incorporant des régularisations ou des prétraitements pour minimiser l'impact du bruit.

3.2 Régression linéaire multiple (MLR)

3.2.1 Principe

La régression linéaire multiple (MLR) est une méthode statistique qui modélise la relation linéaire entre une variable dépendante (Y) et plusieurs variables indépendantes (X) . En chimiométrie, la MLR est utilisée pour prédire une propriété continue, comme la concentration d'un composé, à partir d'un ensemble de variables prédictives, telles que les intensités des spectres IR à différentes longueurs d'onde. Le modèle prend la forme [141,166,175]:

$$[\ Y = X\ \beta + \varepsilon]$$

Où (β) est le vecteur des coefficients de régression, et (ε) représente l'erreur résiduelle. Les coefficients (β) sont estimés en minimisant la somme des carrés des erreurs (méthode des moindres carrés) [138,161].

La régression linéaire multiple est l'approche la plus simple et la plus intuitive de la régression. Elle modélise la relation entre une variable réponse (Y) et un ensemble de variables explicatives (X1, X2,...,Xp) via une combinaison linéaire [141,155,166,175]:

$$Y=\beta 0+\beta 1X1+\beta 2X2+...+\beta pXp+\varepsilon$$

Où β sont les coefficients à estimer, et ε le terme d'erreur.

En chimiométrie, la MLR est utilisée pour prédire une propriété continue, comme la concentration d'un composé, à partir d'un ensemble de variables prédictives, telles que les intensités des spectres IR à différentes longueurs d'onde [158].

3.2.2 Limites

Cette méthode suppose l'indépendance des variables explicatives, une hypothèse souvent violée dans le cas des spectres IR, qui présentent une forte multicolinéarité (les longueurs d'onde sont corrélées entre elles). Cela peut entraîner des instabilités dans les estimations des coefficients et nuire à la capacité prédictive du modèle [139].

Malgré sa simplicité, la MLR est fortement limitée dans le contexte des données chimiométriques, en particulier pour les spectres IR. Les principales contraintes incluent [139] :

- **Multicolinéarité** : Les spectres IR présentent des corrélations élevées entre nombres d'onde, rendant les estimations des coefficients (β) instables et sensibles aux petites variations dans les données .
- **Surajustement** : Avec un grand nombre de variables prédictives (ex. milliers de longueurs d'onde), la MLR peut produire des modèles complexes qui ajustent le bruit plutôt que les tendances réelles.
- **Dimensionnalité élevée** : Lorsque le nombre de variables excède le nombre d'échantillons, la MLR devient inapplicable sans réduction préalable du nombre de variables.

Dans le diagnostic des lithiases urinaires, la régression linéaire multiple (MLR) pourrait être utilisée pour prédire la concentration d'oxalate à partir d'un petit nombre de nombres d'onde présélectionnés (par ANOVA, corrélation, etc.). Toutefois, cette méthode présente deux limites majeures : le nombre maximal de variables doit être inférieur au nombre d'échantillons, la présence de multicolinéarité limite son application directe aux spectres complets, rendant des méthodes comme la PCR ou la PLS plus adaptées.

3.3 Régression sur composantes principales (PCR)

3.3.1 Principe

La régression sur composantes principales (PCR) combine l'analyse en composantes principales (ACP) avec la régression linéaire pour surmonter les limites de la MLR face à la multicolinéarité [171]. Dans un premier temps, l'ACP est appliquée à la matrice (X) des variables prédictives (ex. spectres IR) pour réduire sa dimensionnalité, en générant des composantes principales orthogonales qui capturent la variance maximale des données. Ensuite, une régression linéaire est effectuée entre ces composantes (scores (T)) et la variable cible (Y). Le modèle PCR peut être exprimé comme [158,175] :

$$[\, Y = T\beta + \varepsilon \,]$$

Où (T) est la matrice des scores de l'ACP, (β) sont les coefficients de régression, et (ε) est l'erreur.

3.3.2 Avantages

La PCR présente plusieurs avantages pour l'analyse des spectres IR [178]:

- **Gestion de la multicolinéarité** : En utilisant des composantes orthogonales, la PCR élimine les problèmes d'instabilité liés aux corrélations entre variables prédictives ;
- **Réduction de la dimensionnalité** : Seules quelques composantes principales, expliquant la majorité de la variance, sont utilisées, simplifiant le modèle ;
- **Robustesse au bruit** : En se concentrant sur les composantes principales, la PCR réduit l'impact des variations mineures dans les spectres ;
- Utile lorsque le nombre de variables excède largement le nombre d'échantillons.

3.3.3 Limites

La PCR présente des limites significatives [140,186] :

- Les composantes principales sont sélectionnées pour maximiser la variance dans X, et non pour leur corrélation avec Y, ce qui peut inclure des composantes peu pertinentes pour la prédiction. Par exemple, une composante capturant des variations instrumentales dans les spectres IR peut être incluse, réduisant la performance du modèle;
- La PCR nécessite de choisir le nombre optimal de composantes, souvent via validation croisée, ce qui peut être computationnellement coûteux.

Ces limites rendent la PCR moins efficace que la régression PLS lorsque la relation entre X et Y est faible.

3.4 Régression des moindres carrés partiels (PLS)

3.4.1 Principe

La régression des moindres carrés partiels (PLS) est une méthode chimiométrique puissante qui modélise la relation entre une matrice de variables prédictives (X) et une variable cible (Y) (ou plusieurs variables cibles) en tenant compte des corrélations entre (X) et (Y) [140,151,155,187].

Contrairement à la PCR, qui maximise la variance dans (X), la PLS identifie des composantes latentes qui maximisent la covariance entre (X) et (Y) [164,172].

Le modèle PLS décompose simultanément :

$$[X = T P^T + E] [Y = U Q^T + F]$$

Où T et U sont les matrices des scores pour X et Y, P et Q sont les matrices des loadings, et E et F sont les erreurs. Une régression interne relie T et U.

3.4.2 Application

Dans le diagnostic des lithiases urinaires, la PLS est particulièrement adaptée pour prédire la concentration de composés à partir des spectres IR complets [145] . Par exemple, les spectres IR, prétraités par centrage et dérivation, sont utilisés comme matrice X, et la concentration d'oxalate, mesurée par une méthode de référence, constitue la variable Y.

La PLS peut également intégrer des variables cliniques (ex. pH urinaire, IMC) pour améliorer les prédictions, en capturant les relations entre les données spectroscopiques et biologiques.

Les échantillons sont modélisés dans un espace latent, permettant une estimation quantitative précise même en présence de multicolinéarité et de bruit[188].

3.4.3 Avantages

La PLS offre plusieurs avantages [166,187]:

- Prise en compte conjointe de X et Y;
- Efficace pour les jeux de données complexes (spectroscopie, chimiométrie);
- Bonne capacité de généralisation et validation externe.

3.4.4 Limites

La PLS présente certaines limites [187] :

- Sensibilité aux prétraitements des données (centrage, normalisation, dérivation) qui peuvent influencer les composantes latentes;
- Le choix du nombre optimal de composantes latentes est crucial pour éviter le surapprentissage;
- La PLS suppose une relation linéaire entre X et Y, ce qui peut être restrictif pour des données non linéaires, nécessitant des méthodes comme le SVR dans de tels cas.

3.5 Régression Ridge

3.5.1 Principe

La régression Ridge introduit une pénalisation de type L2 dans le calcul des coefficients, ce qui permet de réduire la variance du modèle sans supprimer de variables [175,189]:

$$\mathbf{Min}_{\beta} \{\sum(Y_i - X_i\beta)^2 + \lambda\sum\beta_j^2\}$$

Où λ est le paramètre de régularisation, contrôlant l'ampleur de la pénalisation.

En réduisant la magnitude des coefficients (β), la régression Ridge améliore la stabilité du modèle, en particulier pour les données spectroscopiques où les variables sont fortement corrélées.

3.5.2 Avantages

La régression Ridge est particulièrement adaptée aux spectres IR bruités ou aux ensembles de données avec un grand nombre de variables prédictives [139,164,188]:

- **Stabilité face à la multicolinéarité** : La pénalisation réduit l'instabilité des coefficients, contrairement à la MLR.
- **Robustesse au bruit** : En limitant l'amplitude des coefficients, la Ridge atténue l'impact des variations instrumentales dans les spectres.
- **Simplicité computationnelle** : La Ridge est moins complexe à optimiser que des méthodes non linéaires comme le SVR.

3.5.3 Limites

La régression Ridge présente des inconvénients [164]:

- Elle ne sélectionne pas automatiquement les variables, contrairement à des méthodes comme le Lasso, conservant toutes les variables prédictives dans le modèle;
- L'interprétation des coefficients est moins intuitive, car la pénalisation modifie leur magnitude;
- Le choix du paramètre (λ), souvent déterminé par validation croisée, peut être computationnellement coûteux;
- Pour des relations non linéaires, la Ridge est moins performante, nécessitant des approches comme le SVR.

4 Modélisation connexionniste

4.1 Principe

Les approches connexionnistes en chimiométrie regroupent des méthodes non linéaires capables de modéliser des relations complexes entre les variables prédictives, souvent inaccessibles par les méthodes linéaires traditionnelles. Ces approches comme les machines à vecteurs de support (SVR) et les réseaux de neurones artificiels (ANN), sont particulièrement adaptées aux ensembles de données hétérogènes ou bruités.

Contrairement aux méthodes de régression classiques, elles permettent une meilleure flexibilité d'ajustement, au prix d'une interprétabilité souvent réduite.

Le principe des approches connexionnistes repose sur l'apprentissage supervisé, où un modèle est entraîné pour minimiser l'erreur entre les prédictions et les valeurs cibles en ajustant des paramètres internes (ex. poids dans les ANN, marges dans le SVR). Ces méthodes utilisent souvent des fonctions de transformation (ex. kernels dans le SVR) pour projeter les données dans un espace de plus haute dimension, facilitant la modélisation de relations non linéaires [140].

4.2 Machines à vecteurs de support pour la régression (SVR)

4.2.1 Principe

La machines à vecteurs de support pour la régression SVR est une méthode d'apprentissage supervisé, repose sur les fondements des machines à vecteurs de support SVM appliqués à des tâches de prédiction continue [190]

Le principe consiste à approximer la fonction cible à l'aide d'un sous-ensemble de données support (support vectors), en tolérant une marge d'erreur ε et en optimisant une fonction de coût régularisée. L'introduction de noyaux (kernels) permet de modéliser des relations non linéaires en projetant les données dans un espace de plus grande dimension., où elles deviennent linéairement séparables. Ce mécanisme rend la SVR particulièrement puissante pour les données spectroscopiques, où les relations entre nombres d'onde et concentrations peuvent être complexes [141,172,184] .

4.2.2 Application

Dans le diagnostic des lithiases urinaires, la SVR est utilisée pour prédire des propriétés continues des lithiases, telles que les proportions de composants, à partir de spectres FTIR et/ou de variables cliniques. Par exemple, les spectres IR, prétraités par dérivation et lissage, sont utilisés comme matrice X, et la concentration d'oxalate, mesurée par une méthode de référence,

constitue la variable Y. Le kernel RBF est souvent privilégié pour sa flexibilité à modéliser des dépendances complexes dans les spectres [152,172].

4.2.3 Avantages

La SVR présente plusieurs avantages pour l'analyse chimiométrique [177,190]:

- **Flexibilité non linéaire** : La SVR capture des relations complexes, contrairement aux méthodes linéaires comme la PLS ou la Ridge ;
- **Robustesse aux outliers** : En se concentrant sur les points à l'intérieur de la marge (ε), la SVR est moins sensible aux données aberrantes ;
- **Gestion de la dimensionnalité** : Le recours aux kernels permet de travailler avec des données de haute dimension, comme les spectres IR, sans réduction explicite ;
- **Généralisation** efficace grâce à la régularisation.

4.2.4 Limites

La SVR comporte des défis [177,191] :

- Requiert une optimisation fine des hyperparamètres par validation croisée, ce qui peut être computationnellement coûteux;
- Moins interprétable que les méthodes linéaires, car les coefficients sont définis dans un espace transformé;
- Sensible au bruit si les hyperparamètres ne sont pas bien ajustés, nécessitant un prétraitement rigoureux des spectres (ex. lissage Savitzky-Golay).

Ces limites justifient une comparaison avec les méthodes linéaires pour déterminer la meilleure approche dans un contexte donné.

5 Développement des modèles chimiométriques

5.1 Étapes du développement des modèles chimiométriques

Le développement de modèles chimiométriques suit une séquence structurée visant à transformer des données brutes, telles que les spectres infrarouges (IR) ou les données cliniques/biologiques, en modèles prédictifs robustes pour le diagnostic des lithiases urinaires [138]. Ce processus est essentiel pour garantir la fiabilité et la généralisation des modèles, en particulier dans un contexte clinique où les prédictions doivent être précises et reproductibles.

Le processus de modélisation s'est articulé autour des étapes suivantes [164]:

1. **Inspection et exploration des données** : Analyse initiale pour détecter les anomalies, les outliers, et les structures sous-jacentes dans les données spectroscopiques ou cliniques ;
2. **Prétraitement** : Application de transformations pour homogénéiser les données, réduire le bruit, et éliminer les artefacts instrumentaux ou environnementaux ;
3. **Sélection des variables** : Identification des variables les plus pertinentes (ex. longueurs d'onde, paramètres cliniques) pour réduire la dimensionnalité et améliorer la performance des modèles ;
4. **Modélisation** : Construction de modèles prédictifs (ex. PLS, SVR) en utilisant les données prétraitées et les variables sélectionnées ;
5. **Validation** : Évaluation de la robustesse et de la précision des modèles à l'aide de métriques comme le coefficient de détermination R^2 et l'erreur quadratique moyenne RMSE.

Ces étapes sont itératives, chaque phase pouvant nécessiter des ajustements en fonction des résultats obtenus. Dans le diagnostic des lithiases urinaires, ce processus permet de passer de spectres IR bruts et de données cliniques hétérogènes (ex. pH urinaire, sexe, type de lithiase) à des modèles capables de prédire la composition chimique des calculs (ex. concentration d'oxalate) ou d'identifier des facteurs de risque cliniques

5.2 Inspection des données

5.2.1 Évaluation

L'inspection des données est la première étape du développement des modèles chimiométriques, visant à comprendre la structure, la qualité, et les éventuelles anomalies des données spectroscopiques et cliniques/biologiques. Cette étape inclut l'analyse des distributions, la détection des outliers, et l'identification des patterns dans les données [138,158]
.

Pour les spectres IR des lithiases urinaires, l'inspection peut révéler des variations systématiques liées à la composition chimique (ex. bandes à ~1310 cm^{-1} pour les oxalates) ou des artefacts instrumentaux (ex. dérives de la ligne de base). Pour les données cliniques, elle permet d'identifier des valeurs aberrantes, comme un pH urinaire hors norme, ou des tendances, comme une association entre l'IMC et la taille des calculs [145].

5.2.2 Colinéarité

La colinéarité, ou corrélation élevée entre variables prédictives, est un défi majeur dans les données spectroscopiques, où les intensités à des longueurs d'onde proches sont fortement

corrélées [139] [141,158]. Dans les données cliniques/biologiques, la colinéarité peut exister entre paramètres, comme l'IMC et le taux de créatinine.

La détection de la colinéarité, souvent via des analyses de corrélation (ex. coefficient de Pearson), est cruciale pour éviter l'instabilité des modèles prédictifs [141]. Par exemple, une forte corrélation entre deux longueurs d'onde dans un spectre IR peut justifier leur regroupement ou la sélection d'une seule variable représentative, certaines variables biologiques (créatininurie, uraturie) se sont avérées corrélées entre elles ou avec l'IMC, justifiant leur regroupement ou élimination.

5.2.3 Détection des valeurs aberrantes (Outliers)

Les outliers, ou valeurs aberrantes, peuvent fausser les modèles chimiométriques en influençant indûment les estimations des paramètres. Dans les spectres IR, les outliers peuvent résulter d'erreurs instrumentales ou d'échantillons non représentatifs (ex. calculs contaminés). Dans les données cliniques, ils peuvent correspondre à des erreurs de mesure (ex. pH urinaire erroné) ou à des cas cliniques rares. La détection des outliers utilise des méthodes comme la distance de Mahalanobis, qui mesure l'écart d'un échantillon par rapport au centre des données dans un espace multivarié. Une fois identifiés, les outliers peuvent être exclus, corrigés, ou conservés si leur origine est cliniquement pertinente [139,158].

5.3 Prétraitement

5.3.1 Centrage-réduction

Le prétraitement des données est essentiel pour homogénéiser les spectres IR et les données cliniques/biologiques, améliorant ainsi la performance des modèles chimiométriques. Le centrage-réduction (ou standardisation) est une technique courante qui consiste à soustraire la moyenne de chaque variable et à diviser par son écart-type. Cela place toutes les variables sur une échelle commune, réduisant l'influence des différences d'unité ou de magnitude [152,162,192].

Par exemple, dans les spectres IR, la standardisation égalise l'importance des intensités à différents nombres d'onde, tandis que dans les données cliniques, elle harmonise des variables comme l'IMC et le pH urinaire.

5.3.2 Dérivation

La dérivation est largement utilisée pour les spectres IR afin d'éliminer les effets de ligne de base, comme les dérives linéaires ou les variations de fond dues à l'instrumentation, et d'accentuer la résolution des pics, en particulier dans les régions de chevauchement spectral [152,162,192].

La dérivée première met en évidence les changements rapides dans le spectre, tandis que la dérivée seconde accentue les détails fins, comme les différences subtiles entre oxalates et phosphates.

Cependant, la dérivation peut amplifier le bruit, nécessitant un prétraitement complémentaire, comme le lissage.

5.3.3 Lissage

Le lissage réduit le bruit dans les spectres IR, améliorant la clarté des signaux chimiques. La méthode de Savitzky-Golay, qui ajuste un polynôme local aux données, est couramment utilisée pour préserver la forme des pics d'absorption tout en éliminant les fluctuations aléatoires. Par exemple, le lissage peut clarifier les bandes spectrales des lithiases mixtes, facilitant leur analyse par des modèles comme la PLS ou la SVR [152,162,192].

Le choix des paramètres de lissage (ex. taille de la fenêtre, degré du polynôme) est critique pour éviter la perte d'information chimique, Ce filtrage a été optimisé par validation croisée.

5.3.4 Autres prétraitements

D'autres techniques peuvent être appliquées selon les besoins, comme la normalisation (ajustement des spectres à une intensité totale constante) ou le codage des variables catégoriques (ex. transformation du sexe ou du type de lithiase en variables binaires). Ces prétraitements sont adaptés aux caractéristiques des données et aux objectifs du modèle, garantissant une analyse robuste et précise [162].

5.4 Sélection des variables

5.4.1 Objectifs

La sélection des variables vise à identifier un sous-ensemble de variables prédictives, qu'il s'agisse de longueurs d'onde IR ou de variables cliniques/biologiques, qui maximisent la performance des modèles chimiométriques tout en réduisant la complexité [141]

Dans le diagnostic des lithiases urinaires, cet objectif est crucial pour :

- **Réduire la dimensionnalité** : Limiter le nombre de longueurs d'onde ou de variables cliniques pour éviter le surajustement et accélérer les calculs.
- **Améliorer l'interprétabilité** : Identifier les variables les plus influentes, comme les bandes IR à ~1310 cm^{-1} pour les oxalates ou le pH urinaire pour les lithiases d'acide urique.
- **Augmenter la robustesse** : Éliminer les variables non informatives ou redondantes, comme les nombres d'onde bruitées ou les paramètres cliniques peu discriminants.

5.4.2 Approches statistiques

Les approches statistiques exploitent des tests pour évaluer l'importance des variables :

- **Analyse de la variance (ANOVA)** : L'ANOVA est utilisée pour identifier les variables discriminantes entre groupes, par exemple pour tester si le pH urinaire diffère significativement entre les types de lithiases (oxalate, phosphate, acide urique). En chimiométrie, l'ANOVA peut guider la sélection des variables cliniques/biologiques pertinentes pour les modèles prédictifs, en identifiant celles qui expliquent les variations dans la composition des calculs [179].
- **Corrélation** : Les analyses de corrélation (ex. coefficient de Pearson ou Spearman) mesurent la relation entre les variables prédictives et la variable cible, ou entre les variables prédictives elles-mêmes pour détecter la colinéarité. Par exemple, une forte corrélation entre l'IMC et la taille des lithiases peut justifier l'inclusion de l'IMC dans un modèle, tandis qu'une corrélation élevée entre deux longueurs d'onde peut conduire à n'en retenir qu'une [138].

5.4.3 Approches régularisées

Les méthodes régularisées intègrent la sélection des variables dans le processus de modélisation:

- **Lasso (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)** : Le Lasso applique une pénalité L1 qui force certains coefficients de régression à zéro, éliminant automatiquement les variables non pertinentes [193–195]. Dans les spectres IR, le Lasso peut sélectionner un sous-ensemble de nombres d'onde (ex. ~1310 cm^{-1} pour les oxalates) pour prédire la concentration d'un composé, réduisant la complexité du modèle.

5.4.4 Approches basées sur modèles

Les approches basées sur modèles utilisent des algorithmes pour évaluer l'importance des variables:

- **Random Forest** : Cet algorithme d'ensemble calcule l'importance des variables en mesurant leur contribution à la réduction de l'erreur de prédiction. Dans le contexte des lithiases, Random Forest peut identifier les nombres d'onde ou les variables cliniques (ex. pH urinaire) les plus discriminantes pour prédire le type de lithiase [196] ;
- **Élimination récursive des caractéristiques (RFE)** : La RFE supprime itérativement les variables les moins importantes, en s'appuyant sur les performances d'un modèle (ex. SVR). Par exemple, la RFE peut réduire un spectre IR à un ensemble restreint de nombres d'onde clés, optimisant la prédiction de la concentration d'oxalate souvent couplée à des modèles comme SVM ou PLS [164] .

5.4.5 Critères

Le choix des variables repose sur un équilibre entre parcimonie (minimiser le nombre de variables) et performance (maximiser la précision du modèle). Les critères d'évaluation incluent le R^2 , le RMSE, et la stabilité du modèle face aux variations des données. La validation croisée est souvent utilisée pour comparer les sous-ensembles de variables et sélectionner celui offrant le meilleur compromis [139,141,161].

6 Évaluation et validation des modèles

6.1 Objectifs

L'évaluation et la validation des modèles chimiométriques visent à garantir leur robustesse, leur précision et leur capacité à généraliser à de nouvelles données dans le contexte du diagnostic des lithiases urinaires [138,164].

Ces étapes sont cruciales pour assurer que les modèles, qu'ils soient basés sur des approches linéaires PLS, Ridge ou non linéaires SVR, produisent des prédictions fiables pour des applications cliniques, comme la quantification de la composition chimique des calculs (ex. concentration d'oxalate) à partir des spectres IR ou l'identification des facteurs de risque à partir des données cliniques/biologiques. Les principaux objectifs incluent :

- **Évaluer la performance** : Mesurer la précision des prédictions (ex. correspondance entre la concentration d'oxalate prédite et mesurée) à l'aide de métriques quantitatives ;
- **Vérifier la robustesse** : S'assurer que le modèle reste performant face aux variations dans les données, comme le bruit instrumental dans les spectres IR ou la variabilité des profils cliniques ;

- **Tester la généralisation** : Confirmer que le modèle peut prédire correctement sur des échantillons non utilisés lors de l'entraînement, essentiel pour son application à de nouveaux patients ;
- **Prévenir le surajustement** : Identifier les modèles qui ajustent excessivement les données d'entraînement, au détriment de leur performance sur des données inédites.

Ces objectifs garantissent que les modèles chimiométriques répondent aux exigences d'un diagnostic clinique fiable, où les erreurs de prédiction pourraient avoir des conséquences sur la prise en charge des patients

6.2 Métriques d'évaluation

Les métriques d'évaluation quantifient la performance des modèles chimiométriques en comparant les prédictions aux valeurs réelles. Dans le diagnostic des lithiases urinaires, ces métriques permettent d'évaluer la précision des prédictions, comme la concentration d'oxalate ou la taille des calculs, à partir des spectres IR ou des données cliniques/biologiques. Les métriques les plus courantes incluent [141]:

- **Coefficient de détermination R^2** : Mesure la proportion de la variance de la variable cible expliquée par le modèle. Un R^2 proche de 1 indique un bon ajustement. Par exemple, un modèle PLS prédisant la concentration d'oxalate à partir des spectres IR avec un ($R^2 = 0.95$) explique 95 % de la variabilité observée. Le (R^2) est souvent calculé pour les données d'entraînement et de validation pour détecter le surajustement. Ce critère est utile pour évaluer la qualité globale du modèle de régression.
- Il est calculé par l'équation suivante :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}$$

Où y_i est la valeur réelle, $\hat{y}_i$ la valeur prédite, et $\bar{y}$ la moyenne des valeurs réelles.

- **Erreur quadratique moyenne (RMSE)** : Quantifie l'erreur moyenne entre les valeurs prédites et réelles, exprimée dans les mêmes unités que la variable cible

Un RMSE faible indique une haute précision. Par exemple, un RMSE de 0.5 % pour la concentration d'oxalate signifie une erreur moyenne de 0.5 % par prédiction. Le RMSE est calculé séparément pour l'entraînement (RMSEC) et la validation (RMSECV ou RMSEP externe) [139].

Elle est calculée par l'équation suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Où RESS : Erreur quadratique moyenne, y_i est la valeur réelle (de référence), $\hat{y}_i$ la valeur prédite, n : nombre d'individus.

D'autres métriques, comme l'erreur absolue moyenne (MAE) ou le coefficient de corrélation de Pearson, peuvent être utilisées en complément, mais (R^2) et RMSE sont les plus courantes en chimiométrie en raison de leur interprétabilité et de leur sensibilité aux erreurs de prédiction [138].

6.3 Méthodes de validation

La validation des modèles chimiométriques teste leur capacité à généraliser à de nouvelles données, en évitant le surajustement et en garantissant leur applicabilité clinique. Deux méthodes principales sont utilisées : la validation croisée et la validation externe

6.3.1 Validation croisée

La validation croisée divise les données disponibles en sous-ensembles pour simuler la performance du modèle sur des données non vues. La méthode la plus courante est la validation croisée de type k-fold, où les données sont divisées en k sous-ensembles (ex. k = 5). À chaque itération, (k-1) sous-ensembles sont utilisés pour entraîner le modèle, et le sous-ensemble restant est utilisé pour tester. Ce processus est répété (k) fois, et les métriques (ex. RMSEC, R^2) sont moyennées. Dans le diagnostic des lithiases urinaires, la validation croisée est particulièrement utile lorsque les ensembles de données sont limités, comme dans les études spectroscopiques avec un petit nombre de calculs. Par exemple, un modèle PLS prédisant la concentration de phosphate peut être validé en 5-fold pour estimer sa précision sur différents sous-ensembles de spectres IR [166,187].

6.3.2 Validation externe

La validation externe utilise un ensemble de données distinct, non impliqué dans l'entraînement ou l'optimisation du modèle, pour évaluer sa performance. Cet ensemble, souvent appelé ensemble de test, est idéalement collecté indépendamment pour refléter les conditions réelles d'application. Dans le contexte des lithiases, un ensemble de test pourrait inclure des spectres IR de nouveaux patients, permettant d'évaluer la capacité du modèle SVR à prédire la

concentration d'oxalate sur des données inédites. La validation externe est considérée comme la méthode la plus rigoureuse, car elle simule l'utilisation clinique réelle, mais elle nécessite un nombre suffisant d'échantillons, ce qui peut être un défi dans les études médicales [166,187].

6.3.3 Comparaison

La validation croisée est plus préférée lorsque les données sont limitées, car elle maximise l'utilisation des données disponibles. La validation externe, bien que plus robuste, nécessite un ensemble de test indépendant, ce qui peut réduire la taille de l'ensemble d'entraînement. Dans cette thèse, les deux approches sont utilisées en complément pour évaluer les modèles (ex. PLS, SVR), garantissant une estimation fiable de leur performance.

6.4 Limites de l'évaluation et validation

Malgré des performances globalement satisfaisantes, plusieurs limites doivent être soulignées [139,141] :

6.4.1 Sensibilité des métriques

Les métriques comme le R^2 ou la RMSE peuvent être sensibles à la distribution des données et à la présence d'outliers, Par exemple, un R^2 élevé peut masquer des erreurs importantes dans des sous-groupes de données (ex. lithiases mixtes), tandis qu'un RMSE peut être influencé par quelques outliers [139] [141].

6.4.2 Taille des ensembles de données

Les études sur les lithiases urinaires impliquent souvent des ensembles de données limités, ce qui peut affecter la fiabilité de la validation croisée et externe. Une validation croisée avec un petit nombre d'échantillons (ex. ($n < 50$)) peut produire des estimations instables du RMSECV, tandis qu'un ensemble de test réduit peut ne pas être représentatif. Ces contraintes soulignent l'importance de collecter des données supplémentaires pour une validation robuste [139,141].

6.4.3 Représentativité des données

La généralisation des modèles dépend de la représentativité des données d'entraînement et de test. Si l'ensemble de test ne reflète pas la diversité des patients (ex. variations dans l'âge, le sexe, ou les types de lithiases), les métriques de validation externe peuvent surestimer ou sous-estimer la performance réelle. Dans le contexte clinique, cela peut limiter l'applicabilité des modèles à des populations spécifiques [139,141].

6.4.4 Complexité des modèles

Les modèles complexes, comme la SVR, peuvent être plus susceptibles au surajustement, en particulier si les hyperparamètres sont optimisés sur l'ensemble de validation. Cela peut fausser les métriques (ex. RMSEC artificiellement bas), nécessitant des stratégies comme la double validation croisée pour une évaluation plus rigoureuse.

Ces limites soulignent la nécessité d'une approche prudente dans l'interprétation des résultats de validation, combinant plusieurs métriques et méthodes pour garantir la fiabilité des modèles dans le diagnostic des lithiases urinaires [139,141,164].

PARTIE PRATIQUE

1 Introduction

L'étude des lithiases urinaires repose sur une approche analytique approfondie permettant de caractériser leur composition et leur structure. Une meilleure compréhension de ces calculs est essentielle pour identifier les facteurs de leur formation et orienter les stratégies de prévention et de prise en charge.

Dans cette partie pratique, différentes approches analytiques complémentaires ont été employées pour analyser et caractériser les échantillons étudiés.

Le **Chapitre 1** est consacré **à la collecte des données cliniques et à la sélection des échantillons**. Il décrit les modalités de prélèvement, de nettoyage, de conservation et de documentation des calculs urinaires, ainsi que les critères ayant guidé le choix des échantillons inclus dans l'étude.

Le **Chapitre 2** est consacré à l'**analyse morphologique**, qui permet d'examiner la structure externe et interne des lithiases afin d'en déduire des informations sur leur mode de formation, et oriente la sélection des zones à analyser plus en détail.

Le **Chapitre 3** porte sur **la caractérisation physicochimique** des échantillons, à travers l'analyse **spectroscopique (FTIR)** et **thermique (DSC/TGA)**, permettant d'identifier les composés chimiques, de détecter d'éventuels mélanges et de confirmer les hypothèses morphologiques par des données expérimentales solides.

Enfin, le **Chapitre 4** est dédié à l'**analyse chimiométrique** qui vise à exploiter l'ensemble des données analytiques et cliniques en appliquant des méthodes statistiques multivariées pour construire des modèles prédictifs, dégager des variables discriminantes, et approfondir la compréhension des mécanismes de formation des calculs.

Chaque chapitre détaille la méthodologie adoptée, les résultats obtenus, ainsi qu'une discussion permettant de mettre en perspective les données recueillies.

CHAPITRE I

Collecte des données et sélection des échantillons

1 Introduction

Ce chapitre présente le protocole de collecte des lithiases urinaires et des données cliniques associées, nécessaires à la caractérisation des échantillons. Il décrit les modalités de prélèvement, de conservation, ainsi que les critères d'inclusion et d'exclusion appliqués.

L'objectif est de constituer une base de données représentative et fiable, servant de fondement aux analyses morphologiques, physicochimiques et chimiométriques des chapitres suivants.

2 Échantillons étudiés

Cette étude a été menée sur 105 patients de l'Est algérien, dont les calculs urinaires ont été collectés entre 2022 et 2025 dans des établissements de santé publics et privés ayant accepté de collaborer, principalement le CHU d'Annaba. Les analyses ont été conduites au Laboratoire de Chimie Analytique de la Faculté de Médecine d'Annaba.

2.1 Collecte des données cliniques et biologiques

Dans un premier temps, un interrogatoire clinique a été mené pour chaque patient afin de recueillir les informations pertinentes liées aux facteurs de risque potentiel de lithiase urinaire. Ces données comprennent :

- **Données démographiques** : Age, sexe
- **Localisation de la lithiase :** rein, uretère, vessie
- **Antécédents médicaux :** Diabète, hypertension artérielle, obésité, lithiase familiale ou personnelle
- **Traitement en cours (principaux médicaments)**
- **Les habitudes alimentaires :** riche en sel, protéines animales, oxalates, calcium.

Ainsi que les données anthropométriques et biologiques:

- **Donnée anthropométrique :** Indice de masse corporelle (IMC) ;
- **Bilan biologique :** Présence d'infection urinaire, bilan métabolique de première intention.

L'ensemble de ces informations a été consigné dans une fiche de renseignement clinique standardisée (cf. Annexe 1), permettant une saisie homogène des données. Afin de garantir la confidentialité et de protéger l'identité des patients, les fiches contenant le nom et le prénom

sont codées dès leur réception, et seule une base de données anonymisée est utilisée pour l'analyse descriptive et chimiométrique réalisée dans le cadre de cette étude.

2.2 Sélection des échantillons

Les calculs urinaires ont été collectés de manière opportuniste, avec pour objectif d'inclure un maximum de cas tout en assurant une diversité représentative des profils cliniques et des caractéristiques des calculs. Les caractéristiques cliniques et analytiques ci-dessous ont guidé la collecte pour garantir une variété de cas, mais n'ont pas été utilisées comme critères d'inclusion stricts, conformément à l'objectif de maximisation de l'échantillon.

- **Caractéristiques cliniques guidant la collecte**

- Caractéristiques médicales : Âge, sexe, symptômes lithiasiques, maladies métaboliques associées (diabète, hypertension, obésité), habitudes alimentaires.
- Représentation variée : Inclusion des patients reflétant la diversité démographique et clinique de l'Est algérien.

- **Caractéristiques analytiques guidant la collection**

- Propriétés des calculs : Taille, forme, aspect macroscopique (couleur, texture).
- Diversité des compositions : Inclusion de calculs couvrant les principales compositions chimiques présumées (oxalate de calcium, acide urique, phosphate, struvite, cystine, ou mixtes).

2.2.1 Critères d'inclusion et d'exclusion

Aucun patient n'a été exclu sur la base des caractéristiques cliniques (âge, sexe, reconnu, etc.) ou analytiques (forme, composition présumée), car l'objectif était de maximiser le nombre de patients pour obtenir un échantillon représentatif. Cependant, des critères d'inclusion et d'exclusion minimaux ont été appliqués pour garantir la qualité des données et la faisabilité des analyses.

2.2.1.a Critères d'inclusion

- **Données disponibles** : Patients ayant fourni les informations essentielles (âge, sexe, Données établies, habitudes alimentaires, bilan biologique) consignées dans la fiche de renseignement clinique (Annexe 1).

2.2.1.b Critères d'exclusion

- **Absence totale de données cliniques** : Patients pour lesquels les informations essentielles (âge, sexe, antécédents, bilan biologique) étaient entièrement manquantes, rendant impossible leur intégration dans l'analyse descriptive ou chimiométrique ;
- **Micro lithiases** : Calculs de taille inférieure à 1 mm, car leur analyse morphologique et physicochimique est difficile en raison de leur petite taille.

2.3 Estimation de la taille de l'échantillon

Pour déterminer la taille minimale nécessaire à une étude descriptive représentative de la population de l'Est algérien, nous utilisons la formule statistique suivante, couramment appliquée dans les études de prévalence [197]:

$$N = Z^2 \cdot p \cdot (1-p) / d^2$$

- N est la taille minimale de l'échantillon,
- Z est la valeur du score de confiance pour un niveau de **95 %** (Z=1,96),
- p est la prévalence estimée de la maladie (**6.16%**),
- d est la marge d'erreur tolérée (**5 %**).

En l'absence de données nationales récentes sur la prévalence de la lithiase urinaire en Algérie, nous avons retenu la valeur de 6,16 %, issue d'une étude menée à Sidi Bel Abbès (Ouest algérien) [198]. Cette valeur est considérée comme représentative pour l'Est algérien, en raison des similitudes climatiques (méditerranéennes, étés chauds favorisant la déshydratation), alimentaires (régime riche en sel et protéines animales) et socio-économiques entre les deux régions.

L'application de la formule donne une taille minimale théorique de N≈89 patients.

Notre objectif était donc de dépasser ce seuil, afin d'assurer une représentativité suffisante.

Au total, 105 patients ont pu être inclus durant la période de collecte (2022–2025), grâce à la collaboration de plusieurs établissements de santé publics et privés. Cette taille d'échantillon excède la valeur minimale estimée, renforçant ainsi la représentativité statistique de l'étude dans le contexte régional.

2.3.1 Profil démographique et clinique des patients inclus

La population étudiée était composée de 105 patients, avec une prédominance masculine (58,1 %). L'âge moyen était de 47,3 ± 13,2 ans, les tranches d'âge [35–50 ans] et [50–65 ans] étant les plus représentées (Fig 32). Parmi les 72 patients avec un IMC disponible, 43,1 % avaient un poids normal, 30,6 % étaient en surpoids et 26,4 % obèses (Fig 33).

Près de deux tiers des patients (65,7 %) présentaient une récidive, soulignant le caractère chronique de la pathologie (Fig 34). Les lithiases étaient principalement rénales (61,9 %), suivies de l'urtère (23,8 %) et de la vessie (14,3 %) (Fig 35).

Des anomalies métaboliques ont été identifiées chez 42,9 % des patients, dominées par le diabète (11,4 %) et l'hyperparathyroïdie primaire (7,6 %) (Fig 36). Par ailleurs, plus de 40 % des patients recevaient un traitement concomitant susceptible d'influencer le risque lithogénique (metformine, vitamines, diurétiques) (Fig 37).

Les infections urinaires, principalement dues à Escherichia coli (41,7 %) et Proteus mirabilis (16,7 %), touchaient 11,4 % des patients (Fig 39-40).

La répartition des caractéristiques démographiques et cliniques, démontre une couverture adéquate de la population cible, englobant une diversité d'âges, de sexes, de localisations des lithiases et d'anomalies métaboliques. Avec une taille d'échantillon de 105 patients, cette étude est conforme aux normes épidémiologiques pour des analyses cliniques similaires.
La prédominance des récidives (65,7 %) et la présence d'infections urinaires ou de traitements concomitants font ressortir les défis cliniques typiques de la lithiase urinaire, renforçant la pertinence de l'échantillon.

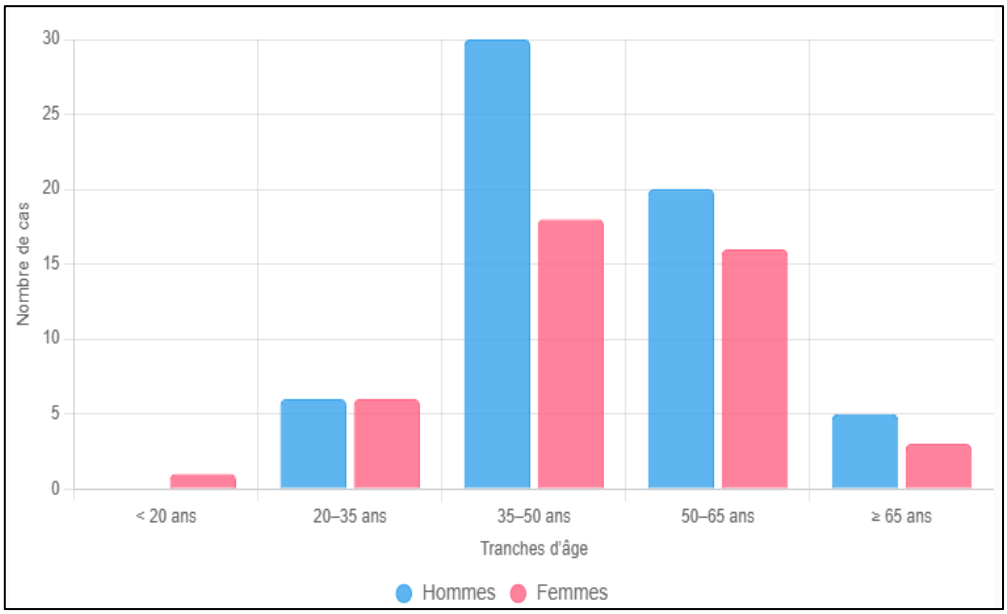


Figure 32: Répartition des patients selon le sexe et les tranches d'âge

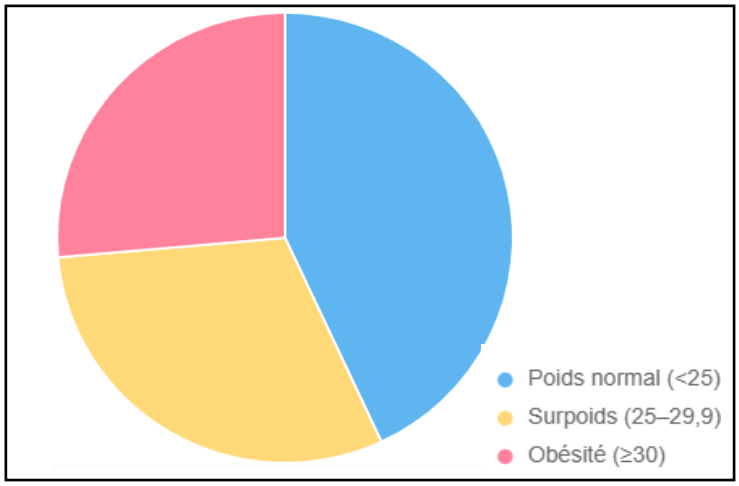


Figure 33 : Répartition des patients selon l'indice de masse corporelle (IMC)

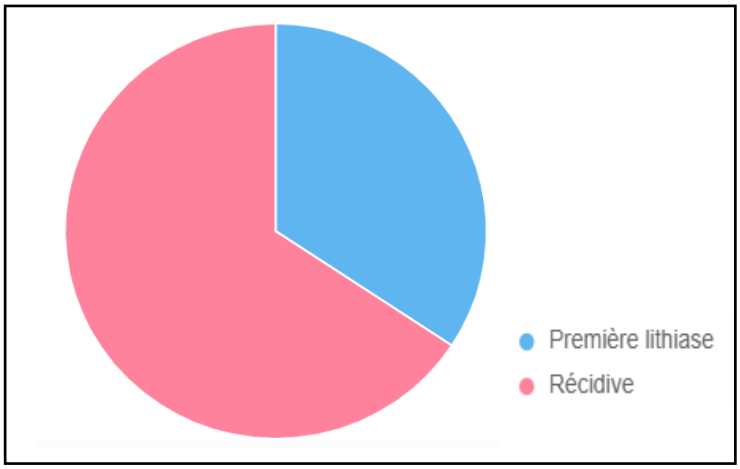


Figure 34 : Répartition selon l'historique des lithiases

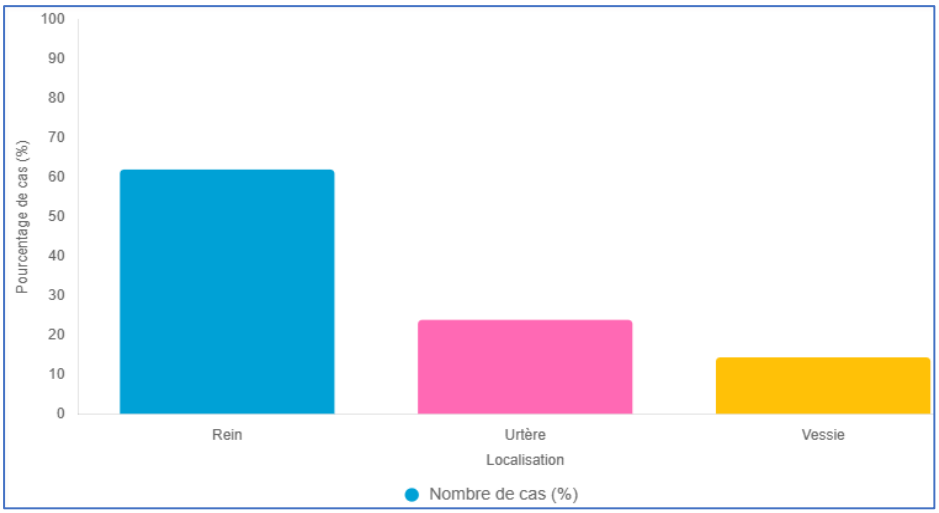


Figure 35 : Répartition des localisations lithiasiques chez les 105 patients

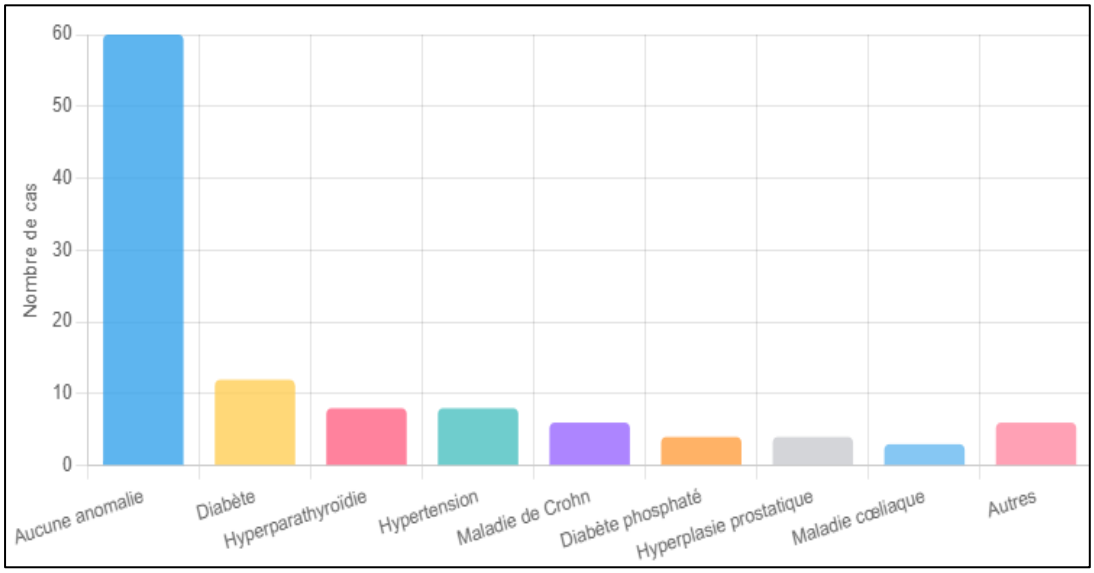


Figure 36 : Répartition des cas selon les anomalies médicales

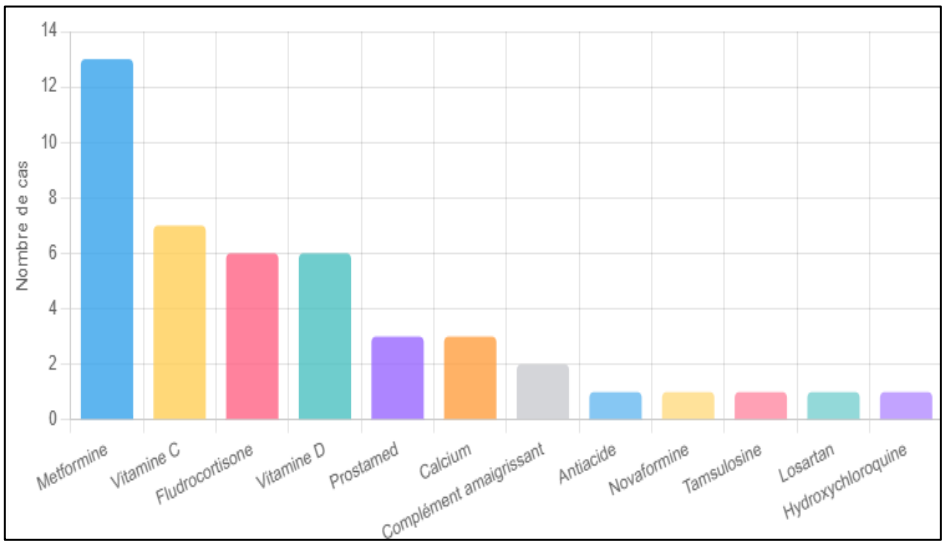


Figure 37 : Répartition des cas selon les traitements médicamenteux

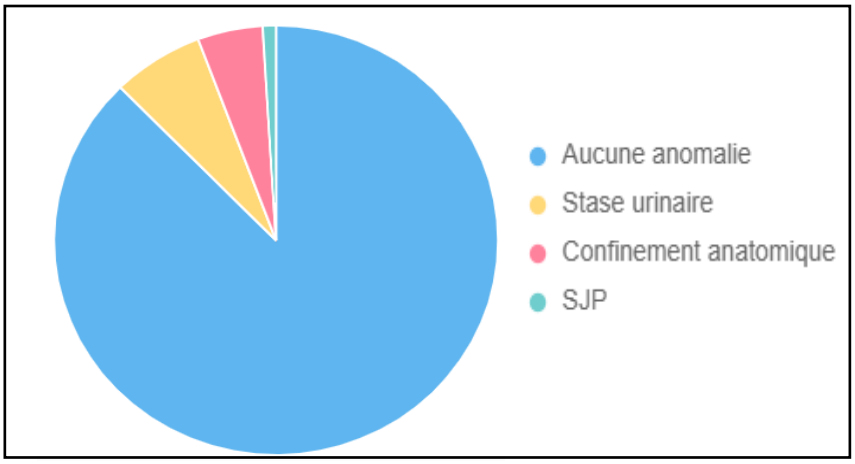


Figure 38 : Répartition des cas selon les anomalies des voies excrétrices

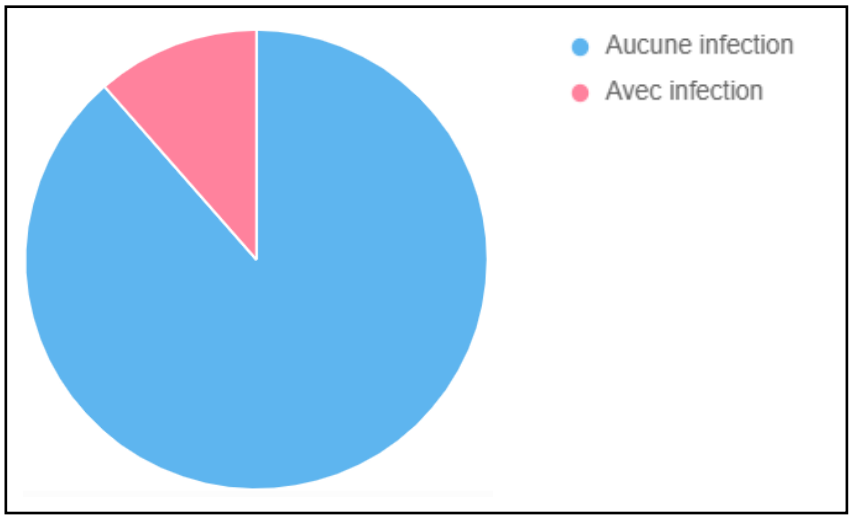


Figure 39 : Répartition des cas selon la présence d'infection

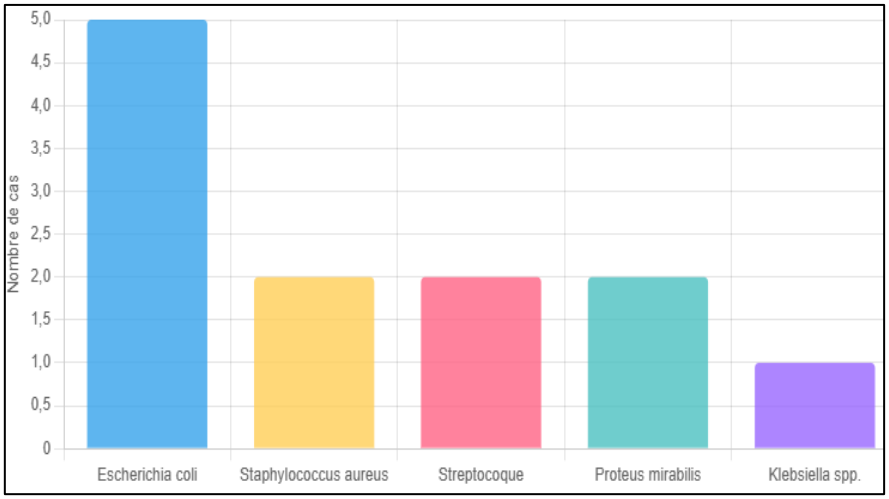


Figure 40 : Répartition des cas selon les bactéries identifiées

CHAPITRE II

ANALYSE MORPHOLOGIQUE DES LITHIASES URINAIRES

1 Introduction

L'analyse morphologique constitue une étape clé dans la caractérisation des lithiases urinaires. Elle permet d'établir un lien entre la structure externe, l'organisation interne et la composition chimique.

L'objectif de cette analyse est d'exploiter ces observations pour mieux comprendre le processus de formation des calculs et orienter les analyses spectroscopiques. En identifiant les zones les plus représentatives, il devient possible d'optimiser l'acquisition des spectres infrarouges et d'assurer une caractérisation plus précise des phases minérales présentes

2 Matériels

L'analyse morphologique des calculs urinaires a été réalisée à l'aide des équipements suivants :

- **Loupe binoculaire** Stemi DRC ZEISS® 305
  - Grossissement : 1,6x - 45x
  - Distance de travail : 110 mm
  - Source lumineuse : LED
- **Pied à coulisse numérique**
  - Précision : ± 0,01 mm
  - Plage de mesure : 0-150 mm
- **Pince**
  - Type : fine en acier inoxydable, adaptée à la manipulation délicate des calculs
- **Lame de bistouri n°11**
  - Type : lame en acier inoxydable.
  - Utilisation : découpe précise des calculs pour observation interne
- **Appareil photo (smartphone) :**
  - Résolution : 60 MP
  - Mode macro pour capturer les détails des structures internes et externes.

3 Méthodes

3.1 Étape pré-analytique

Avant l'observation à la loupe binoculaire, les échantillons de calculs urinaires ont été préparés selon un protocole décrit dans les sous-sections suivantes afin de garantir une analyse morphologique fiable et reproductible.

- Après réception du calcul, un numéro d'identification est attribué à chaque échantillon pour assurer la traçabilité.

3.1.1 Nettoyage des échantillons

- **Isolation rapide** du calcul pour éviter toute contamination biologique (urines, résidus chirurgicaux) ;
- **Rinçage à l'eau distillée** pour éliminer les résidus sanguins susceptibles de masquer la structure du calcul ;
- Séchage à température ambiante à l'air libre pendant 48 heures. L'humidité résiduelle peut perturber l'analyse infrarouge en modifiant la ligne de base ou en superposant des bandes d'absorption attribuables à l'eau. Par ailleurs, une élévation de la température au-delà de 120 à 200 °C peut entraîner des transformations cristallines ou thermiques, souvent accompagnées d'un brunissement ou d'une modification de la texture. Afin de prévenir toute altération avant analyse, aucune source de chaleur active n'a été employée.

3.1.2 Préparation des échantillons pour l'analyse

3.1.2.a Sélection des fragments à analyser

- **Choix de calculs représentatifs de différentes morphologies :** Lorsque les échantillons contenaient plusieurs calculs, un ou deux fragments par échantillon ont été sélectionnés pour l'analyse. Dans les cas où les calculs présentaient tous la même morphologie (forme, couleur, texture), un fragment représentatif a été choisi en fonction de ses dimensions et de sa structure les plus caractéristiques. Cette sélection est effectuée par un examen visuel initial, permettant d'identifier le spécimen le plus typique de l'échantillon, afin d'assurer une analyse morphologique représentative.
- **Sélection des fragments les plus intacts pour garantir une observation optimale.**

3.1.2.b Préparation des coupes transversales

- Fixation du calcul sur une lame à l'aide d'une pince;
- Sectionnement délicat à l'aide d'un bistouri chirurgical (lame n°11) pour exposer les différentes couches internes;
- Les calculs de petite taille (< 3 mm) ou fragments ont été observés entiers sans sectionnement, en raison de leur fragilité et de leur taille insuffisante pour une coupe fiable ;
- Pour les calculs friables, le sectionnement a été effectué avec une pression minimale pour préserver l'intégrité des couches internes ;

- Élimination des débris et récupération des fragments utiles.

Cette préparation permet d'obtenir des échantillons prêts pour l'observation et l'identification des différentes structures morphologiques sous la loupe binoculaire.

3.2 Étape analytique

3.2.1 Observation et description morphologique

L'observation morphologique a été réalisée à l'aide d'une loupe binoculaire Stemi DRC ZEISS® 305, permettant une analyse détaillée des structures externes et internes des calculs urinaires, afin d'évaluer les critères morphologiques suivants :

- **Aspect général** : forme, texture et rugosité de la surface, couleur, aspect.
- **Structure** : présence de porosité, organisation des cristaux.
- **Organisation**: classification en structures organisées, peu organisées ou inorganisées.

3.2.1.a Réglages et installation de la loupe

- Positionnement de la loupe sur une surface stable et bien éclairée.
- Réglage de l'éclairage incident et du grossissement variable (1.65 x à 4x) selon la taille et les détails à observer.
- Ajustement de la distance de travail (110 mm) pour une mise au point optimale.

3.2.1.b Observation

- Les échantillons ont été placés sur une lame propre sous la loupe.
- Un éclairage adapté a été utilisé pour optimiser la visibilité des structures**.**

L'observation a porté sur trois niveaux morphologiques :

- **Observation des structures externes**

- Analyse de la surface externe du calcul pour identifier sa texture (lisse, rugueuse, épineuse).
- Notation des couleurs, opacités, d'aspects, et de cristallinités.

- **Observation des structures internes**

- Examen des différentes couches après sectionnement, en distinguant :
  - Le noyau : centre du calcul, souvent constitué du premier cristal précipité.
  - Les couches intermédiaires : successions de dépôts en strates concentriques.
  - La couche externe : dernière phase de croissance du calcul.

3.2.1.c Prise d'images et documentation

- Les observations sont enregistrées sous forme de photographies via le mode macro du téléphone portable, puis utilisées sans traitement numérique pour préserver l'authenticité des observations.
- Chaque image est associée au numéro d'identification du calcul.

3.3 Étape post-analytique

3.3.1 Classification et exploitation des résultats

3.3.1.a Organisation des observations

Les observations ont été consignées dans un tableau récapitulatif comprenant :

- La texture des différentes couches (noyau, couches intermédiaires, surface externe).
- La couleur et l'aspect macroscopique.
- La présence de structures spécifiques (stratifications, fissures, agrégats cristallins)

3.3.1.b Attribution d'un typage morphologique

Sur la base des caractéristiques morphologiques observées, un typage morphologique a été attribué à chaque échantillon en référence à la classification de Daudon décrite au chapitre 2, tableaux (7-13). Cette classification repose sur :

- **L'aspect de la surface externe** (forme, couleur, texture).
- L'analyse **de la section interne** (présence de noyaux, structure en couches, porosité).

Ce typage a été consigné dans un tableau récapitulatif pour chaque patient (annexe 6).

3.3.1.c Exploitation des résultats

- Sélection des zones les plus représentatives pour l'analyse infrarouge et l'analyse thermique, afin d'optimiser l'acquisition des spectres et d'affiner la caractérisation chimique des calculs.
- Le tableau récapitulatif servira de base pour les analyses chimiométriques développées dans le chapitre dédié, pour établir des tendances et des corrélations éventuelles entre :
    - Le type morphologique des calculs;
    - La composition cristalline des calculs;
    - Les données cliniques et biologiques des patients;
    - Les fréquences des différents types morphologiques ont été calculées et présentées sous forme de tableaux et de graphiques.

4 Résultats et discussions

4.1 Classification et répartition des types des lithiases urinaires

L'étude morphologique des lithiases urinaires a permis d'identifier deux grandes catégories de calculs :

- **Les calculs homogènes (**purs**),** constitués d'un seul type cristallin principal, représentant 60.95 % des échantillon analysés.
- **Les calculs hétérogènes (**mixtes), présentant une combinaison de plusieurs phases cristallines, constituant 39.05 % des cas.

Ces calculs, qu'ils soient **homogènes** ou **hétérogènes**, ont été catégorisés selon la classification de Daudon (chapitre 2, tableaux 7-13), qui prend en compte l'apparence externe et l'organisation interne des échantillons. La distribution des calculs analysés est détaillée dans le tableau 16.

Tableau 16 . Distribution des calculs analysés

Modalités	Effectif par modalité	Fréquence par modalité (%)
Lithiases pures	64	60.95
Lithiases mixtes	41	39.05
TOTAL	105	100

Les résultats montrent une prédominance des calculs homogènes (pures), tout en révélant une proportion non négligeable de calculs mixtes, ce qui témoigne à la fois la spécificité de certains mécanismes lithogéniques et la diversité des conditions physiopathologiques impliquées.

Ces catégories ont ensuite été subdivisées en différents types et sous-types, en fonction des caractéristiques morphologiques observées, notamment l'aspect externe, la structure interne, et la présence de stratification.

4.2 Analyse comparative des types morphologiques

Afin de mieux comprendre la distribution des types de lithiases, une analyse des fréquences a été réalisée. Le tableau ci-après permettra de voir la répartition des différents types de lithiases dans chaque catégorie.

Tableau 17 . Nombre et proportions des types et sous-types morpho-constitutionnels des lithiases analysées selon le sexe.

Typage	Homme		Femme		Total	
Lithiases homogènes (pures)						
	N=38	**%**	**N= 26**	**%**	**N=64**	**%**
Ia	13	34,24	9	34,65	22	34,37
Ib	1	2,63	-	0	1	1,56
Id	5	13,15	-	0	5	7,81
Ie	4	10,52	3	11,53	7	10,93
Iia	4	10,52	3	11,53	7	10,93
IIb	-	0	1	3,84	1	1,56
IIIa	8	21,05	4	15,38	12	18,75
IIIb	-	0	2	7,69	2	3,12
IVa1	-	0	2	7,69	2	3,12
IVa2	1	2,63	2	7,69	3	4,68
IVb	1	2,63	-	-	1	1,56
IVd	1	2,63	-	-	1	1,56
Lithiases hétérogènes : combinaison de deux phases cristallines						
	N=20	**%**	**N= 16**	**%**	**N=36**	**%**
Ia+IIId	1	5,00	-	-	1	2,77
IIIb+ IIIa	4	20,00	2,00	12,50	6	16,66
IIIb+Ia	1	5,00	-	-	1	2,00
IIa + Ib	1	5,00	-	-	1	2,77
IIa + Ia	4	20,00	4,00	25,00	8	22,22
IIa +Iva1	1	5,00	-	-	1	2,77
IIb+ Iia	1	5,00	-	-	1	2,77
IIb+ IVa1	1	5,00	-	-	1	2,77

IIc+IVa1	3	15,00	-	-	3	8,33
IVb + Id	1	5,00	-	-	1	2,77
Ia+AU2	1	5,00	-	-	1	2,77
Ia+IVa1	1	5,00	-	-	1	2,77
IIIa + Ib	-	-	1	6,25	1	2,77
IIId + IVb	-	-	5	31.25	5	13,88
IIb+ Ib	-	-	1	6,25	1	2,77
IVb + IVa1	-	-	1	6,25	1	2,77
IVb + IVc	-	-	2	12,50	2	5,55
Lithiases hétérogènes : combinaison de trois phases cristallines						
	N=3	**%**	**N= 2**	**%**	**N=5**	**%**
IIa+Ia+IVa1	1	33,33	-	-	1	0,95
IIb +Ia+IVa1	1	33,33	-	-	1	0,95
Ia+IIIa+ IIIb	1	33,33	-	-	1	0,95
IIb +IIa+ IVa1	-	-	1	50,00	1	0,95
Ib+ IIa+ IVa1	-	-	1	50,00	1	0,95

L'échantillon comprend 64 lithiases homogènes (60,95 %) et 41 hétérogènes (39,05 %), incluant 64 calculs purs, 36 calculs à deux phases cristallines, et 5 à trois phases.

Les lithiases homogènes (60,95 %) sont dominées par le type **Ia** (COM, 34,37 %, 22/64), suivi de **IIIa** (acide urique, 18,75 %, 12/64), et des types **Ie** et **IIa** (COM-COD, 10,93 % chacun, 7/64). Les sous-types rares (**Ib**, **IIb**, **IIIb**, **IVa1**, **IVa2**, **IVb**, **IVd**, 1,56-4,68 %) reflètent une diversité cristalline. Comparée à la littérature, la prévalence de **Ia** est comparable aux 37,21 % rapportés dans une étude algérienne de **Sekkoum et al** [199], avec un écart de 2,84 % probablement lié à des facteurs alimentaires locaux (moindre consommation d'oxalates à l'Est algérien), Elle reste cependant inférieure aux 54-58 % observés en Europe par l'étude de **Siener et al** et **Castiglione** [200] [66], probablement en raison de variations régionales avec un climat méditerranéen favorisant l'hydratation et réduisant la concentration urinaire en oxalate. Pour le type IIIa, La prévalence observée (18,75 %) est conforme aux données locales rapportées par **Sekkoum et al.,** qui ont également trouvé une fréquence de **18,75 %.**[199], indiquant une

contribution Constante de l'acide urique, mais elle dépasse les 12,6% observés en France par **Abid et al.** [201]**,** suggérant une prévalence locale de facteurs comme l'hyperuricémie, possiblement liée à un régime riche en purines (viandes, poissons) ou à une fréquence élevée de diabète. **IIa** à 10,93 % s'aligne avec les 10-20 % attendus, observés par **Abid et al.** [201] .

Les sous-types rares (**Ib**, **IIb**, **IIIb**, **IVa1**, **IVa2**, **IVb**, **IVd**, 1,56-4,68 %) incluent **IVa1** (carbapatite 3,12 %) et **IVb** (struvite, 1,56 %), cohérents avec les 1-6 % rapportés par **Siener et al** et **Castiglione et al** [200] [66]. Le type **IVa2** (carbapatite, 4,68 %) s'aligne avec les observations de **Castiglione et al** (4%) [66], sur les phosphates calciques.

Les lithiases hétérogènes (39,05 %) incluent 36 calculs à deux phases et 5 à trois phases. La combinaison **IIa+Ia** (22,22 %, 8/36) est la plus fréquente, confirmée par les 20-25 % rapportés par les études européennes de **Ye et al** [202] et **Daudon et al** [203] et les études Algériennes de **Bouslama et al** [204] [202], pour les calculs mixtes d'oxalate. **IIIb+IIIa** (16,66 %, 6/36) et **IIId+IVb** (13,88 %, 5/36), souvent liée à des calculs infectieux, s'alignent avec les 10-15 % de lithiases infectieuses qui note que **IIId** est rare (0.3-1.2%) [199] [204].

Les 15 combinaisons rares à deux phases (2,77-8,33 %) et les 5 combinaisons à trois phases (4,76%) révèlent une complexité cristalline peu fréquente, mais cliniquement et physiopathologiquement pertinente, car elle peut traduire une évolution progressive, des épisodes lithogéniques successifs ou une instabilité métabolique.

Un diagramme en barres (Figure 42) visualise les proportions des principaux types homogènes (**Ia, IIIa, Ie, IIa)** et hétérogènes (**IIa+Ib, IIIb+IIIa, IIId+IVb**), illustrant la prédominance de **Ia** et suivie par **IIIa** (11,43 %), ainsi que la diversité des sous-types.

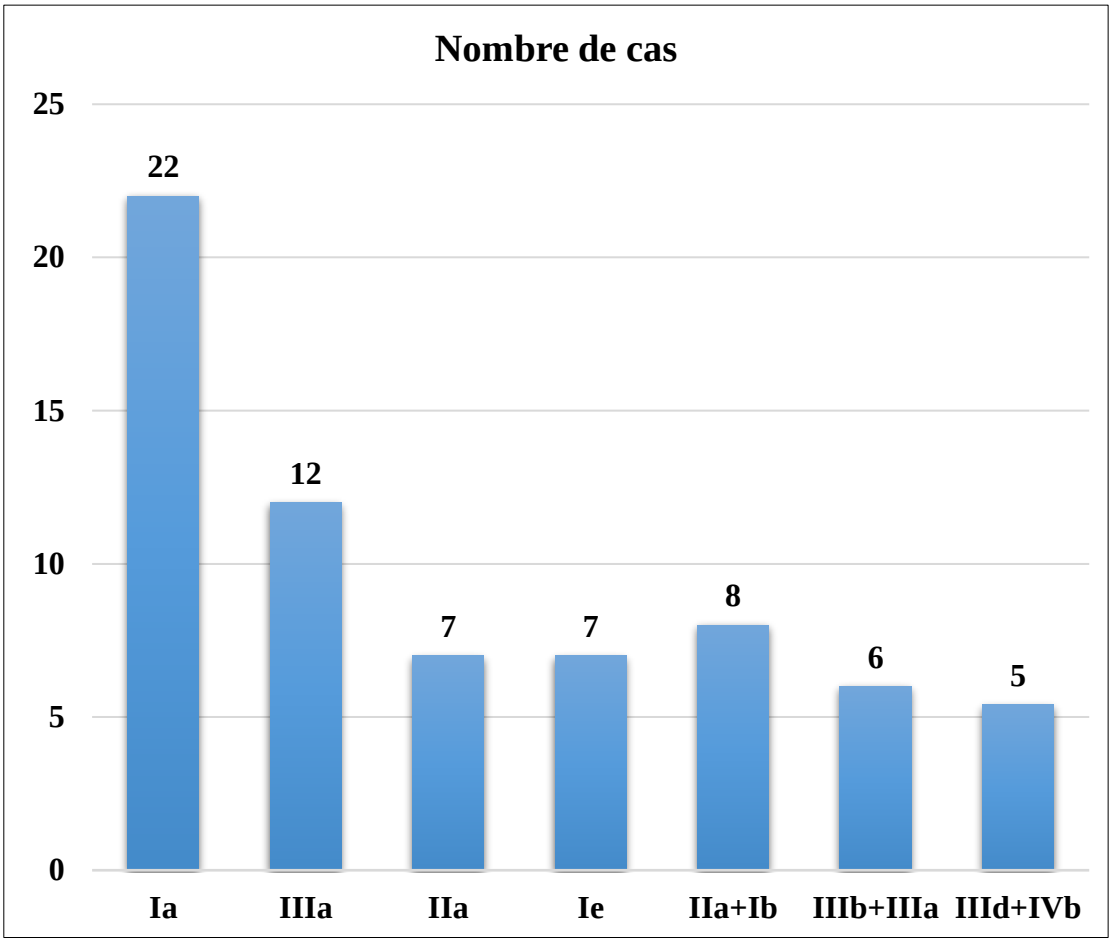


Figure 41: Répartition des principaux types de lithiases urinaires

Pour offrir une vue exhaustive, un diagramme en soleil (Figure 43) illustre la répartition hiérarchique de tous les types lithiasiques urinaires analysés (n=105).

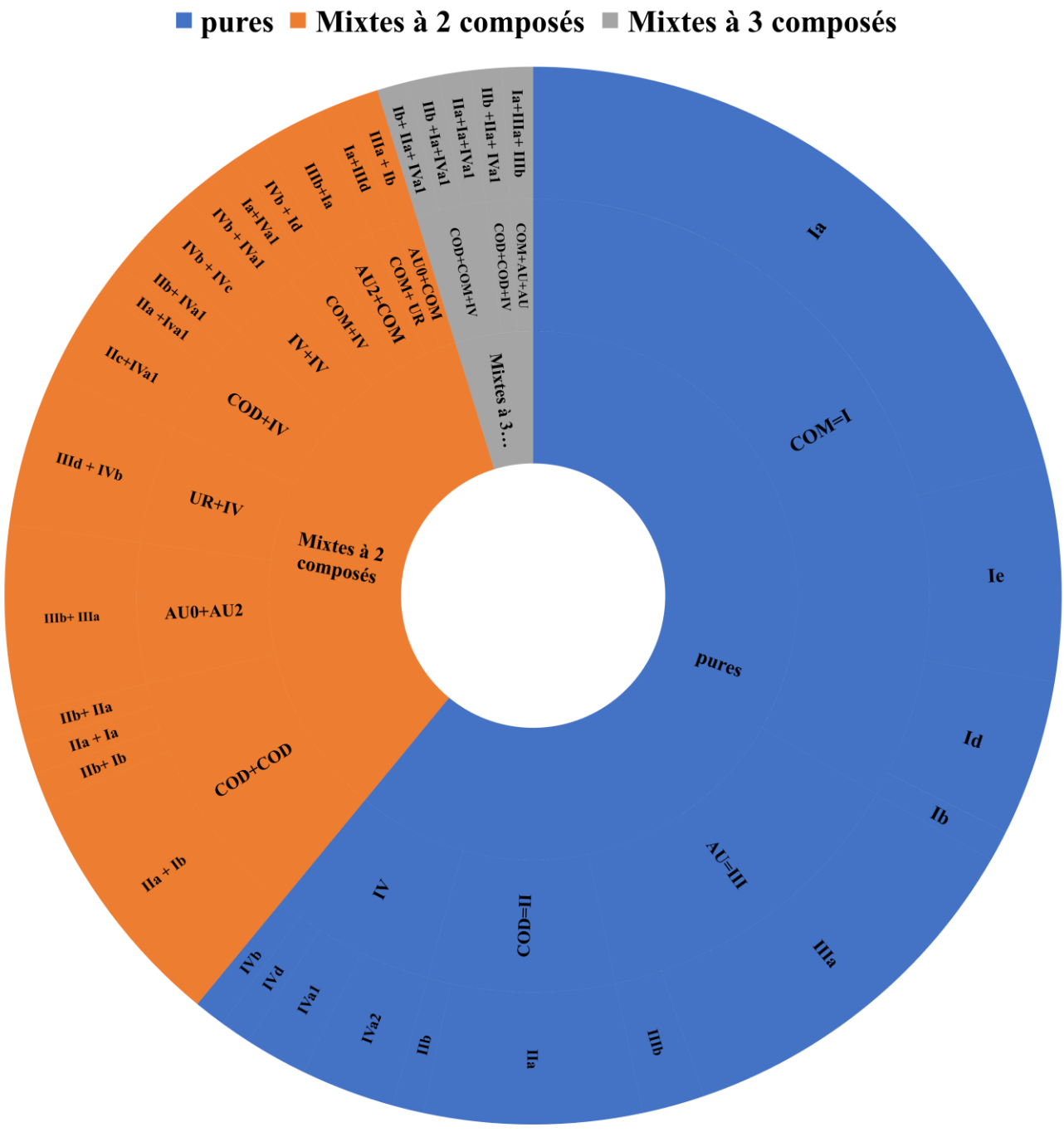


Figure 42 : Répartition hiérarchique des types lithiases urinaires analysés.

L'anneau interne distingue les grandes catégories : **Pures** (60,95 %), **Mixtes à 2 composés** (34,29 %), et **Mixtes à 3 composés** (4,76 %), mettant en évidence la dominance des lithiases pures. L'anneau externe détaille les sous-types, avec **Ia** (20,95 %) et **IIIa** (11,43 %) comme les plus fréquents parmi les pures, suivis par **IIa+Ib** (7,62 %) et **IIIb+IIIa** (5,71 %) dans les mixtes

à 2 composés. Les sous-types rares, tels que **Ib** (0,95 %) ou **IIa+Ia+IVa1** (0,95 %), enrichissent la diversité, bien que leur faible effectif limite leur visibilité. Cette visualisation hiérarchique, bien que complexe, met en lumière la variété des compositions lithiasiques et prépare leur classification morphologique dans la section suivante

4.3 Description des caractéristiques morphologiques observées

L'analyse morphologique des lithiases urinaires permet de distinguer plusieurs types cristallins, chacun ayant des caractéristiques spécifiques influencées par le processus de formation et les conditions physiopathologiques du patient. L'oxalate de calcium, l'acide urique et les phosphates sont les principaux composants des calculs urinaires. Chaque type présente des différences au niveau de la structure externe, interne et parfois de la stabilité cristalline.

Dans ce qui suit, nous allons détailler les principales caractéristiques morphologiques observées dans notre série d'échantillons en fonction de leur composition et de leurs associations possibles.

4.3.1 Morphologies de l'oxalate de calcium :

L'oxalate de calcium, un constituant majeur des calculs urinaires, se présente sous trois formes cristallines différentes :

- **Monohydraté (COM/Whewellite)** : structure monoclinique, très stable et courante, avec une faible solubilité.
- **Dihydraté (COD/Weddellite)** : structure tétragonale, souvent sous forme de spicules.
- **Trihydraté (COT/Caoxite)** : phase rare et thermodynamiquement instable.

Ces formes présentent des morphologies distinctes, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur, aidant au diagnostic et à la compréhension de leur formation.
Dans cette section, nous allons décrire en détail les caractéristiques morphologiques des deux phases les plus courantes : COM /COD.

4.3.1.a Oxalate de calcium monohydraté

La Whewellite est la phase la plus fréquemment rencontrée dans les calculs urinaires. Elle se distingue par des caractéristiques morphologiques spécifiques, tant en surface qu'en structure interne. Et par les conditions de formation.

Les figures ci-dessous illustrent certaines des morphologies de l'oxalate de calcium monohydraté observées dans notre série d'échantillons :

- Certains calculs observés (Figure 43). Présentent une surface mamelonnée, parfois lisse, avec une dureté marquée et une homogénéité structurelle**.** Leur couleur varie du brun au brun foncé**,** parfois avec une voile grisâtre, certaines surfaces montrent des plaques de Randall ainsi que des zones d'ombilification (Figure 44).
- En coupe, ces calculs révèlent une organisation concentrique bien défini**e**, associée à une cristallisation radiale. La structure interne est dense et cristalline, de teinte brun foncé uniforme. Le noyau, lorsqu'il est visible, partage ces mêmes caractéristiques.
- Ces observations correspondent aux sous-types **Ia** de la classification de Daudon.

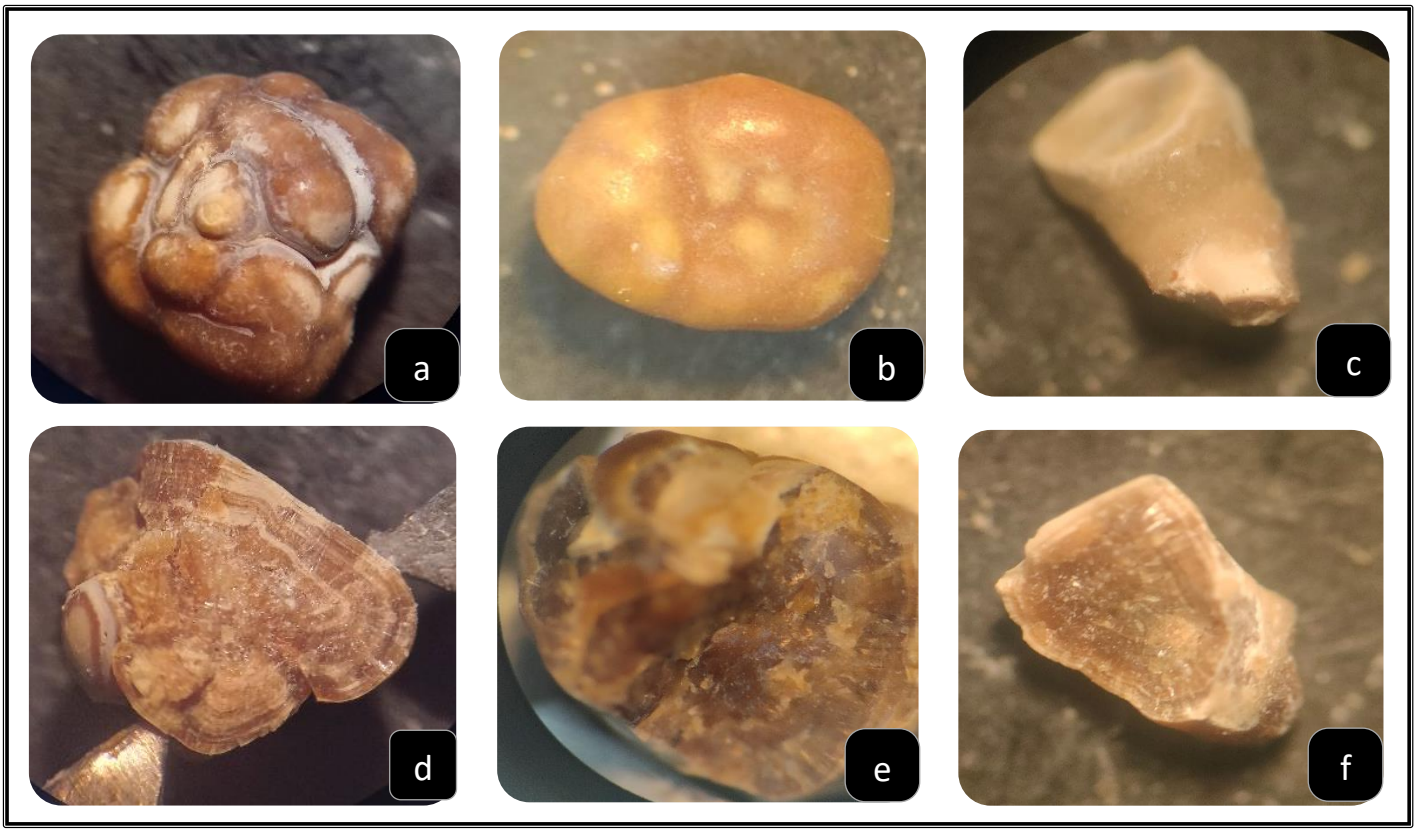


Figure 43 : Morphologies de l'oxalate de calcium monohydraté (whewellite) de sous-type Ia : a) surface mamelonnée de couleur brun foncé, b) surface lisse de couleur brun foncé, c) surface lisse de couleur brun, « d » , « e » et « f » : Sections concentriques

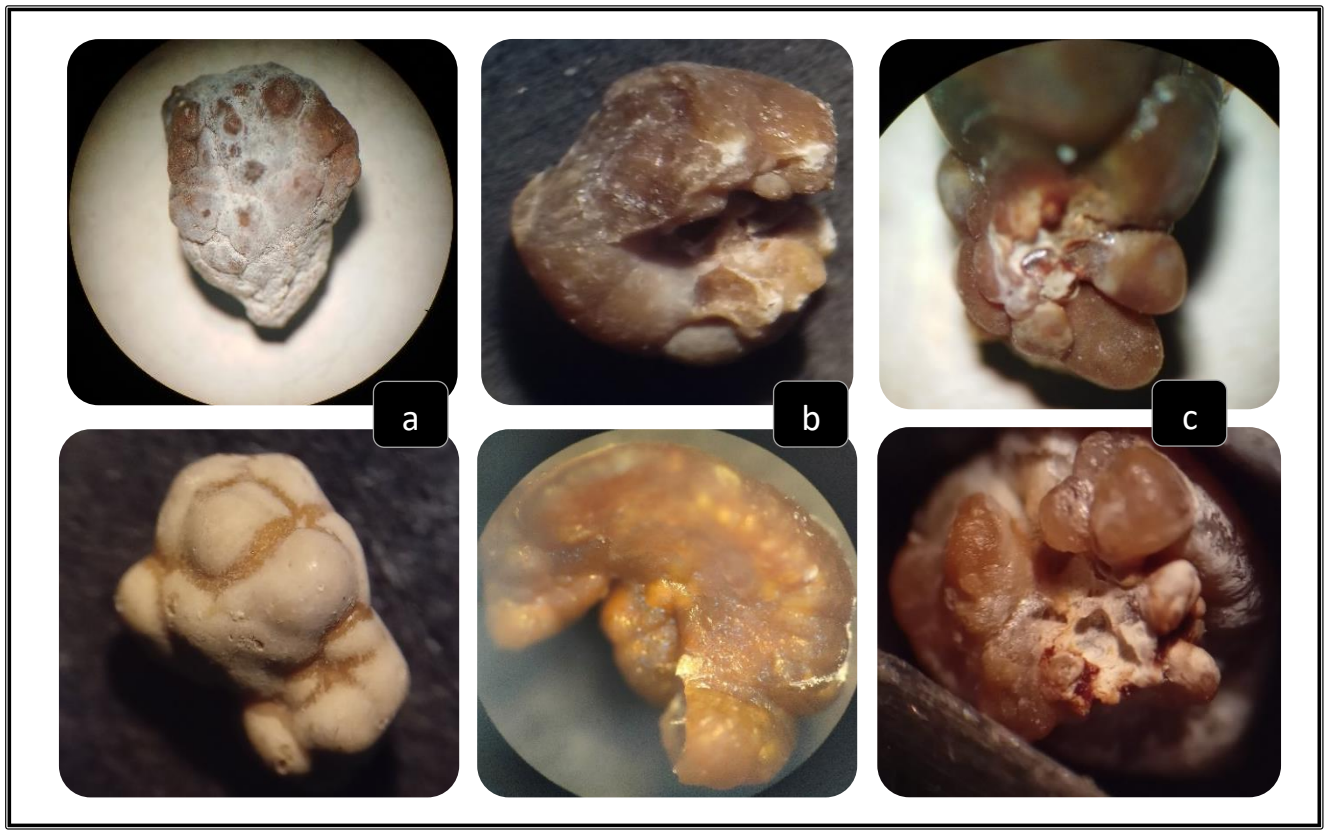


Figure 44 : Morphologies de l'oxalate de calcium monohydraté (whewellite) de sous-type Ia : a) surface mamelonnée avec voile grisâtre, b) surface lisse avec ombilications, c) plaque de Randal

- D'autres calculs observés (Figure 46) présentent une surface mamelonnée mais plus rugueuse que les précédents. Leur texture est cristalline et hétérogène, avec une coloration brun-noir. Ils sont globalement plus ou moins durs.
- En coupe, ces calculs révèlent une structure interne peu poreuse, avec une organisation lacunaire. L'ensemble présente un aspect homogène, de teinte brun noir. Le noyau, lorsqu'il est visible, partage ces mêmes caractéristiques sans distinction nette avec le reste du calcul.
- Ces observations correspondent aux sous-types **Ib** de la classification de Daudon.



Figure 45: Morphologies de l'oxalate de calcium monohydraté (whewellite) de sous-type Ib

- Certains échantillons observés (Figure 47) présentent une surface lisse et cristalline, avec une dureté marquée. Leur couleur varie du beige au grisâtre. Leur forme est souvent cubique avec des faciès collants caractéristiques.
- En coupe, ces calculs révèlent une structure homogène avec des couches concentriques fines. L'organisation interne est microcristalline et bien stratifiée, avec une teinte dominante grège.
- Le noyau, lorsqu'il est visible, partage les mêmes caractéristiques structurales et colorimétriques.
- Ces observations correspondent aux sous-types **Id** de la classification de Daudon.



Figure 46 : Morphologies de l'oxalate de calcium monohydraté (whewellite) de sous-type Id : Surface (en haut) ; Section (en bat)

- D'autres échantillons (Figure 48) présentent une surface rugueuse, bourgeonnante ou mamelonnée d'aspect cristallin et hétérogène. Leur couleur varie du brun au jaune clair, avec une structure plus lâche que les autres sous-types.
- En coupe, la texture apparaît friable, peu poreuse et faiblement cohésive. La structure interne, bien que cristalline, est peu dense et de teinte brun-jaune clair.
- Ces observations correspondent aux sous-types **Ie** de la classification de Daudon.



Figure 47: Morphologies de l'oxalate de calcium monohydraté (whewellite) de sous-type Id : la surface (en haut) ; la section : (en bas)

4.3.1.a Oxalate de calcium dihydraté (COD = C2) –Weddellite

La Weddellite constitue la seconde phase d'oxalate de calcium. Bien qu'elle soit une phase métastable, le COD se forme en proportions significatives dans les calculs rénaux. Son système cristallin tétragonal lui confère une morphologie spécifique sous forme de spicules caractéristiques, généralement visibles en surface.

La figure 49 illustre quelques exemples des morphologies du COD.

La surface de certains échantillons (figure 49: a-b-c) apparaît hérissée, formée de spicules proéminents et brillants, constitués de prismes allongés, effilés ou en forme d'aiguilles, ce qui confère à l'ensemble une apparence prismatique marquée. Ces cristaux peuvent être isolés, ou regroupés en agrégats prenant la forme de cristaux bipyramidaux, organisés parfois en structures en rosettes ou en étoiles. Leur couleur varie du blanc au jaunâtre, et l'aspect externe semble plus friable et fragile que celui des calculs en oxalate de calcium monohydraté (COM).

Ce profil morphologique évoque fortement le sous-type **IIa** de la classification de Daudon.

D'autres spécimens (figure 49 : d-e-f) montrent une surface spiculée, composée de cristaux ternes, opaques, épais, aux angles plus ou moins émoussés. L'aspect général est moins brillant, avec une organisation cristalline peu nette et un relief moins marqué que dans d'autres formes de COD.

En coupe, ces calculs présentent une section cristalline compacte et inorganisée, sans architecture interne discernable ni agencement régulier des structures.
Ces caractéristiques morphologiques, à la fois en surface et en coupe, correspondent au sous-type **IIb** de la classification de Daudon.

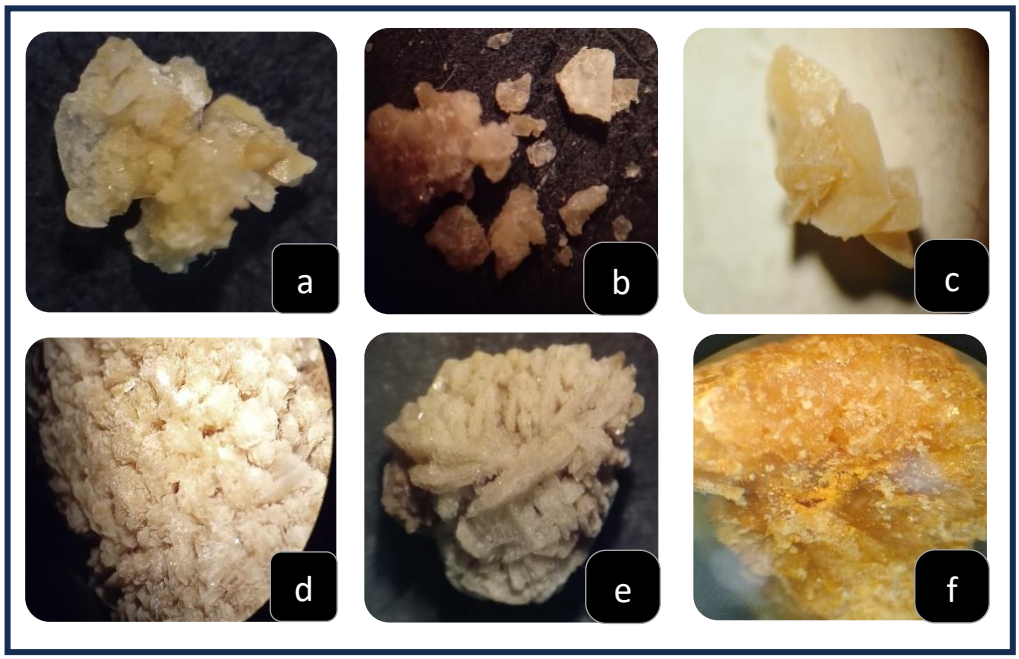


Figure 48 : Morphologies de l'oxalate de calcium dihydraté (weddellite) de sous-type **IIa (en haut)** et **IIb (en bas)**

La Weddellite (COD), bien que fréquemment observée dans les lithiases urinaires, est une phase métastable. Au fil du temps, une transformation progressive en Whewellite (COM) peut être observée. Cette transition traduit probablement une modification du microenvironnement urinaire, favorisant la stabilité thermodynamique du COM par rapport au COD.
Morphologiquement, cette conversion se manifeste par (Figure 50) :

- Une perte progressive des spicules du COD, qui deviennent émoussés;
- Un assombrissement de la structure, avec une évolution vers une organisation plus dense et homogène.

Des indices morphologiques peuvent persister, même lorsque le calcul apparaît majoritairement constitué de COM. La présence résiduelle de spicules émoussés témoigne d'une formation initiale en COD, suggérant une origine hypercalciurique.

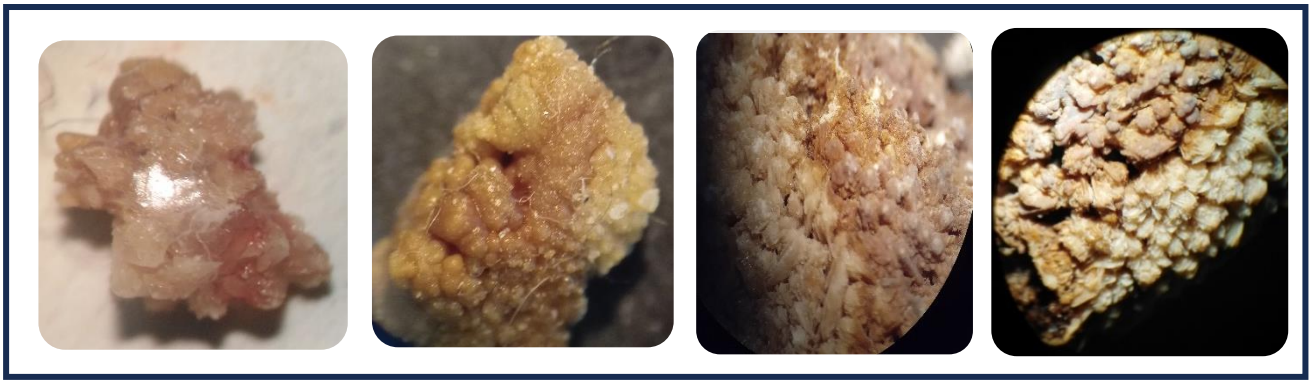


Figure 49 : Morphologies de la conversion cristalline de COD en COM.

L'association Whewellite - Weddellite est relativement fréquente dans les calculs urinaires, traduisant une précipitation séquentielle. Dans ce contexte, la formation de l'un ou l'autre composant peut survenir dès l'initiation du calcul ou de manière intermittente au cours de son évolution. La partie centrale (Noyau) reflète généralement le mécanisme initial de nucléation, tandis que les zones périphériques (section et surface) témoignent de causes supplémentaires associées ou d'épisodes métaboliques successifs (Figure 51).

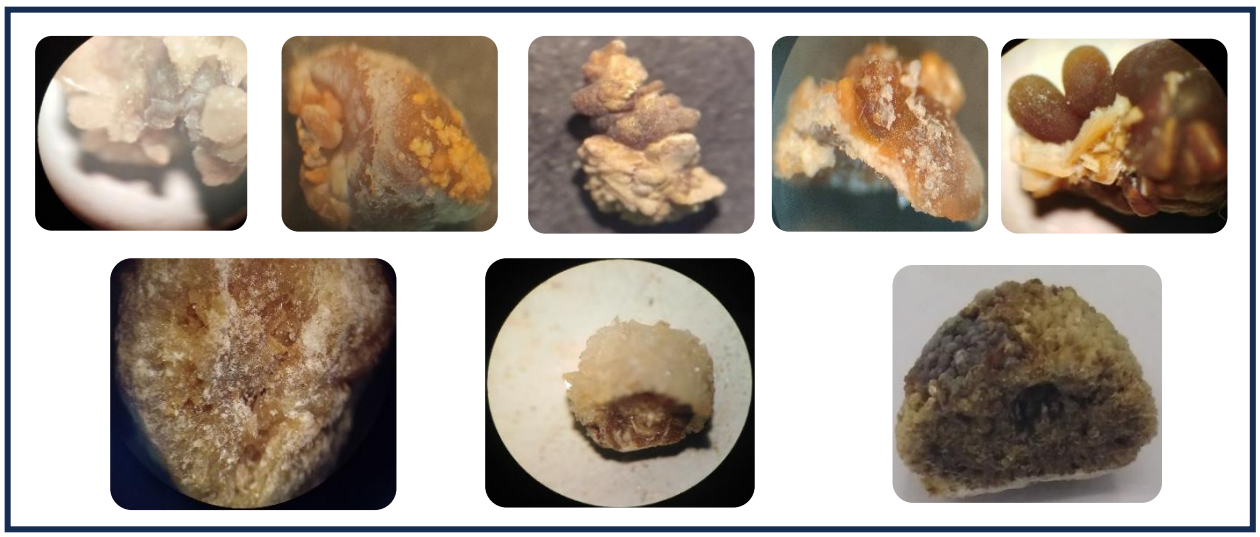


Figure 50 : Morphologies de l'association de COD et COM : en surface (en haut) ; en section (en bas)

4.3.2 Morphologies de la lithiase urique et purique :

La lithiase urique est formée essentiellement de deux composants lithiasiques à savoir l'acide urique anhydre, qui est la phase la plus thermodynamiquement stable, et l'acide urique

dihydraté (moins stable). Morphologiquement, ces composants se forment selon les sous-types IIIa et IIIb.

Dans la figure 52 on donne des exemples de lithiases uriques qui illustrent ces différents aspects.

- Certaines lithiases d'acide urique observés (Figure 52-a) se caractérisent par une surface lisse à faiblement irrégulière. Leur couleur varie de l'orange au brun, avec une homogénéité apparente de la structure externe.

À la coupe, ces calculs révèlent une organisation caractérisée par une structure concentrique, et une organisation cristalline radiale. Le noyau, lorsqu'il est présent, apparaît souvent dense et difficilement dissociable du reste du calcul.

Ces observations correspondent aux sous-types **IIIa** de la classification de Daudon

- D'autres échantillons d'acide urique (Figure 52-b) présentent une **structure plus poreuse et irrégulière** en surface, avec une couleur généralement **plus claire** que les calculs en IIIa. Leur morphologie externe semble plus **friable et hétérogène**.

En coupe, ces calculs révèlent la présence de **cavités intra-structurelles**, témoignant d'une **cristallisation moins dense**. L'organisation interne est plus **dispersée**, traduisant un processus de précipitation différent de celui observé dans les IIIa.

Ces observations correspondent aux sous-types **IIIb** de la classification de Daudon

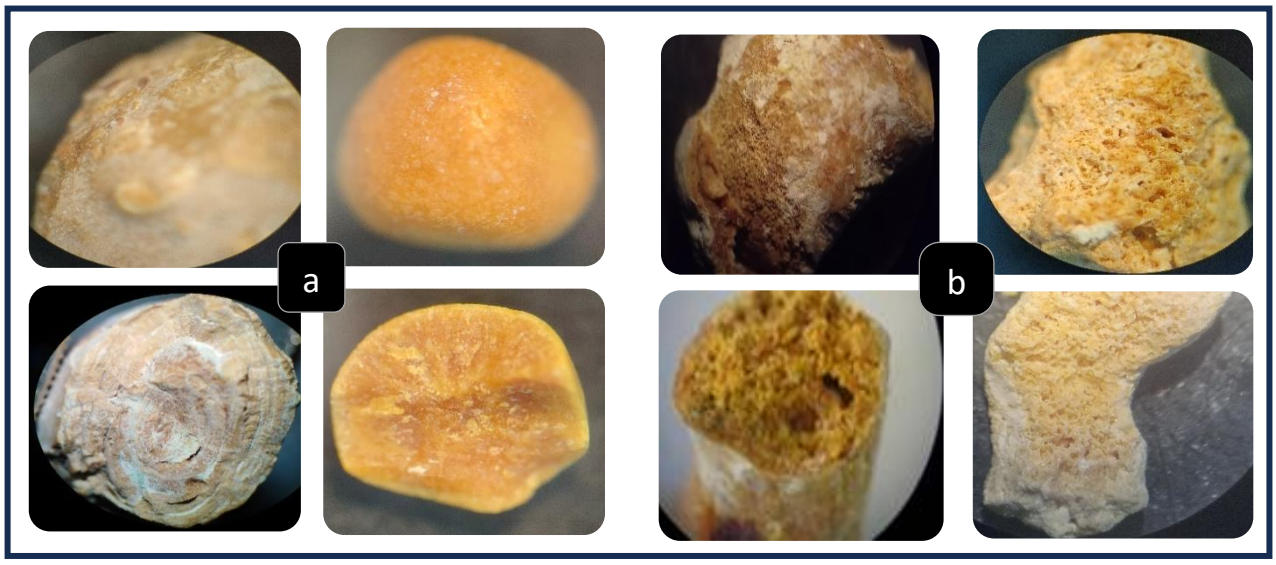


Figure 51 : Morphologies de la lithiase urique ; a) IIIa ; b) IIIb

4.3.2.a Lithiases mixtes puriques

Parmi les calculs analysés, Quelques-uns (figure 53) présentent une association entre l'acide urique anhydre (AU0) et l'acide urique dihydraté (AU2), traduisant une précipitation séquentielle de ces phases puriques sous forme de couches distinctes. En surface, deux cas sont observés : dans certains échantillons, la couche externe est dominée par AU0, montrant une texture lisse et une teinte brun clair ; dans d'autres, la couche externe est composée d'AU2, avec une texture légèrement plus poreuse et une teinte jaune pâle, reflétant les différences d'hydratation entre les deux phases.

En coupe transversale, l'organisation interne révèle une superposition de couches bien définie : les couches d'AU0 se présentent sous forme de dépôts compacts et homogènes, contrastant avec les couches d'AU2 qui apparaissent plus friables, probablement en raison de la présence d'eau zéolithique dans AU2. Ces couches distinctes, avec une alternance des phases dominantes en surface, réduisent les variations successives des conditions de précipitation, telles que des fluctuations du pH urinaire ou de la concentration en acide urique, influençant l'état d'hydratation des phases puriques au fil du temps.

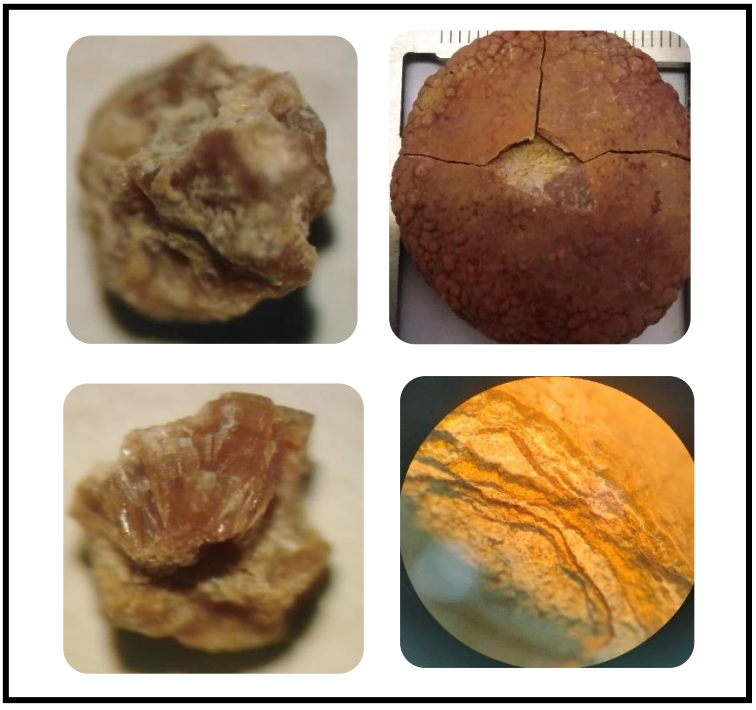


Figure 52 : Morphologies de l'association entre : la surface (en haut) ; la section (en bas)

D'autres encore (figure 54) présentent une association entre l'acide urique et l'oxalate de calcium monohydraté (COM), traduisant une précipitation conjointe ou successive de ces

phases minérales. En surface, ces calculs montrent une morphologie lisse à légèrement rugueuse, avec des variations de teinte allant du brun foncé au jaune orangé.

En coupe transversale, l'organisation interne révèle une **superposition de couches distinctes**, où l'acide urique ou l'urate apparaît sous forme de zones plus homogènes, alors que l'oxalate de calcium monohydraté se distingue par des structures plus denses et cristallisées. Ces observations suggèrent des conditions de précipitation changeantes au cours du temps, influencées par des modifications locales du milieu urinaire.

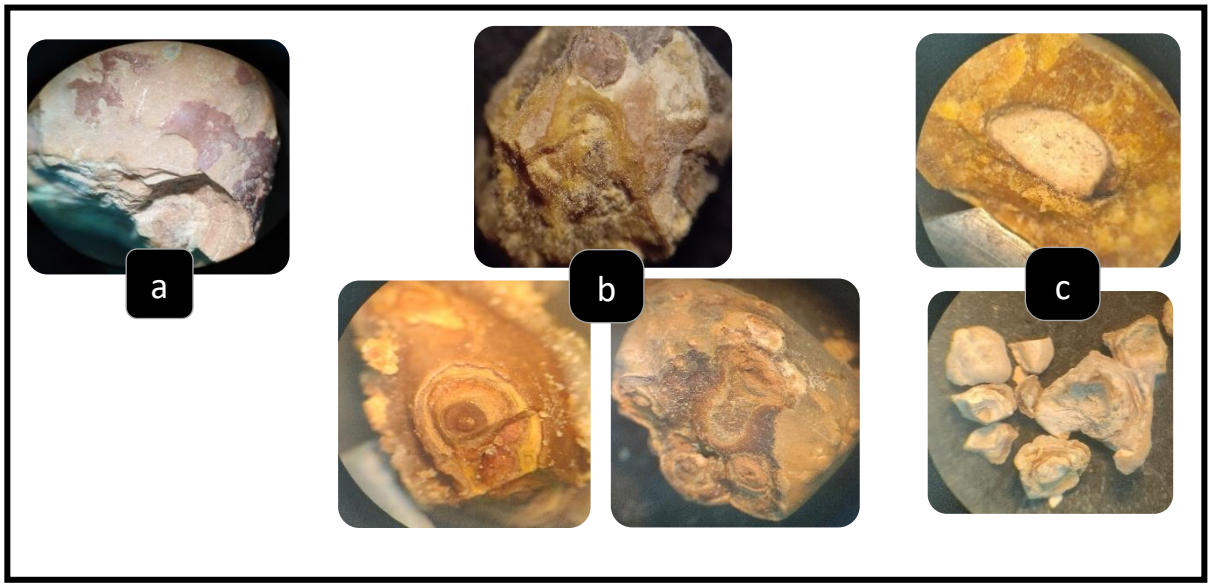


Figure 53 : Morphologies de l'association entre : a) en surface (IIIa +COM :; b) en surface (COM+IIIb: en haut) ; en section (IIIa+COM :en bas) ; c) COM+IIId en section

4.3.3 Morphologie de la lithiase phosphocalcique

Les lithiases phosphatiques sont constituées principalement de **carbapatite** et de **struvite**. Leur morphologie varie en fonction de la nature prédominante de ces constituants et des conditions de précipitation successives. Elles présentent souvent une organisation interne stratifiée, traduisant une croissance par dépôts successifs de minéraux.

4.3.3.a Carbapatite

D'autres types de calculs (Fig 55-a) présentent une **morphologie granulaire et rugueuse**, avec une couleur variant du **blanc-crème au jaune pâle**. En surface, des zones d'agrégats minéraux sont visibles, donnant un aspect hétérogène à certains échantillons.

Lors de la coupe transversale, ces calculs révèlent une **organisation en couches concentriques** marquées, traduisant une précipitation progressive. Certains échantillons montrent des zones de transition plus sombres, suggérant des inclusions organiques ou des dépôts secondaires de minéraux.

Ces observations correspondent aux sous-types **IVa1** de la classification de Daudon

D'autres calculs (Fig 55-b) se distinguent par une **surface plus lisse**, parfois brillante, avec des zones translucides visibles en lumière incidente. Leur structure externe semble plus homogène, bien que des variations locales puissent être observées.

En coupe, ces calculs présentent une **structure interne plus compacte**, avec des zones bien définies. Certains échantillons révèlent des **transitions marquées entre différentes phases minérales**, témoignant d'une évolution progressive au cours de leur formation.

Ces observations correspondent aux sous-types **IVa2** de la classification de Daudon

Ces différences morphologiques pourraient refléter des variations dans les conditions physico-chimiques ayant favorisé la précipitation de la carbapatite

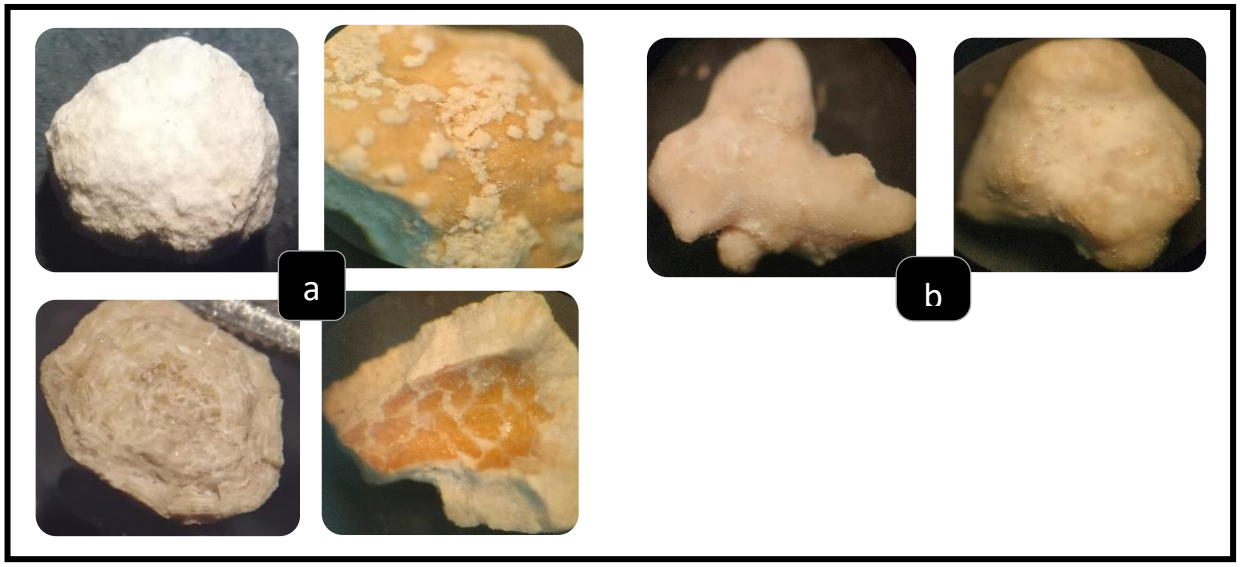


Figure 54 : Morphologies de l'association entre : a) IVa1 b) IVa2

Quelques-uns (Figure 56) montrent une surface lisse à légèrement irrégulière, avec une couleur variant du blanc cassé au beige clair. La texture externe peut sembler fragile, avec des fractures visibles dans certaines zones.

En coupe transversale, ces calculs révèlent une organisation interne lamellaire, marquée par des dépôts successifs de minéraux en fines couches parallèles. Cette structure traduit un processus de précipitation particulier, influencé par des variations locales de saturation en phosphates de calcium.

Ces observations correspondent aux sous-types **IVd** de la classification de Daudon

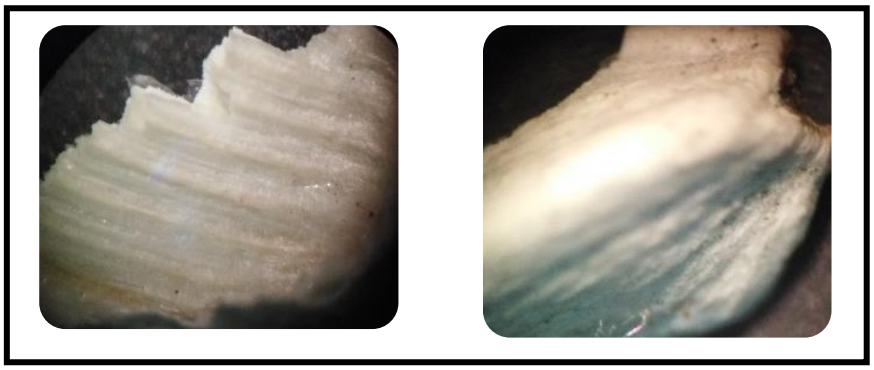


Figure 55 : Morphologies de brushite de sous type IVd

4.3.3.a Lithiases mixtes phosphatiques (IVa + IVc)

Parmi les calculs analysés, certains montrent une association entre la carbapatite et la struvite (figure 57), révélant un processus de précipitation successif ou simultané. Ces calculs présentent une morphologie externe irrégulière, où des zones granuleuses de carbapatite coexistent avec des structures cristallisées typiques de la struvite.

En coupe, l'organisation interne montre une superposition de couches distinctes, alternant entre des zones plus homogènes et des zones poreuses blanchâtre à crème. Ces transitions suggèrent une évolution dynamique du calcul au cours de sa formation.

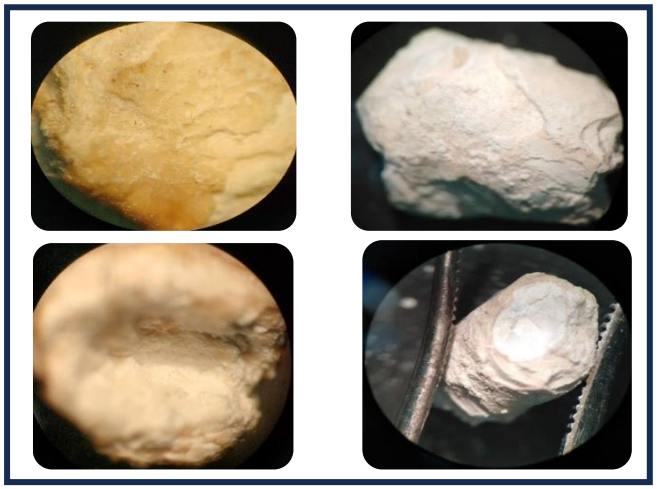


Figure 56 : Morphologies de l'association entre carbapatite et struvite : a) b) : surface IVa1 ; c) d) section de struvite IVc

D'autres encore présentent une association entre la carbapatite et d'autres structures cristallines (figures 58-59), traduisant une précipitation simultanée ou séquentielle de ces phases minérales.

En surface, ces calculs présentent une morphologie granuleuse et irrégulière, tandis qu'en coupe transversale, on observe une superposition de couches distinctes. La structure interne montre des zones alternantes entre des parties plus compactes et dure et homogènes et d'autres plus poreuses et friable, indiquant une évolution progressive du calcul au fil du temps.
Ces variations morphologiques reflètent des conditions de précipitation changeantes au cours du temps, influencées par des modifications locales du milieu de formation du calcul.

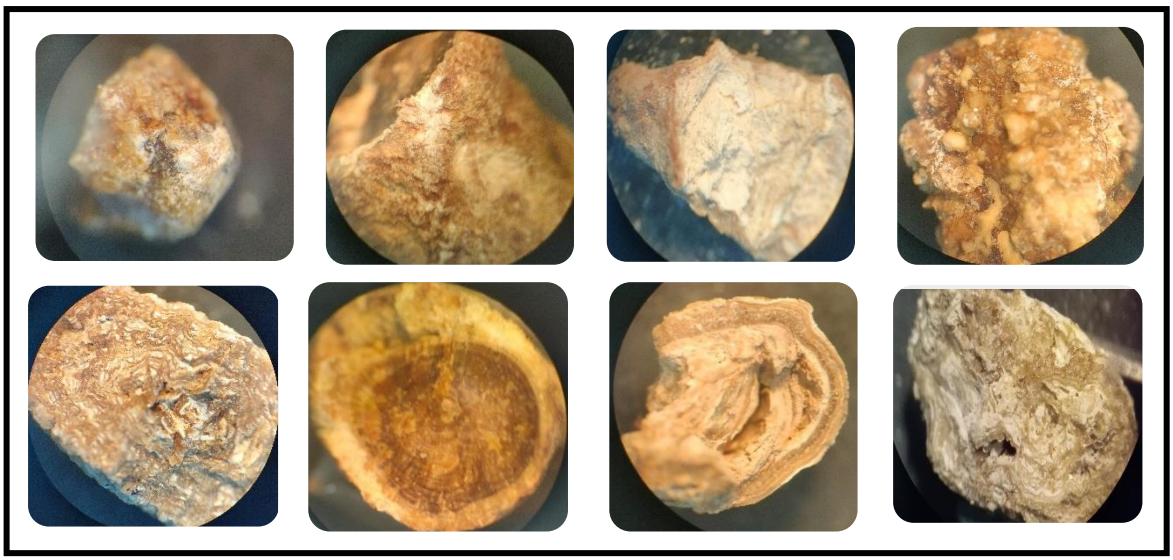


Figure 57 : Morphologies de l'association entre carbapatite et COM (IVa1+COM) : en surface (en haut) ; en section (en bas

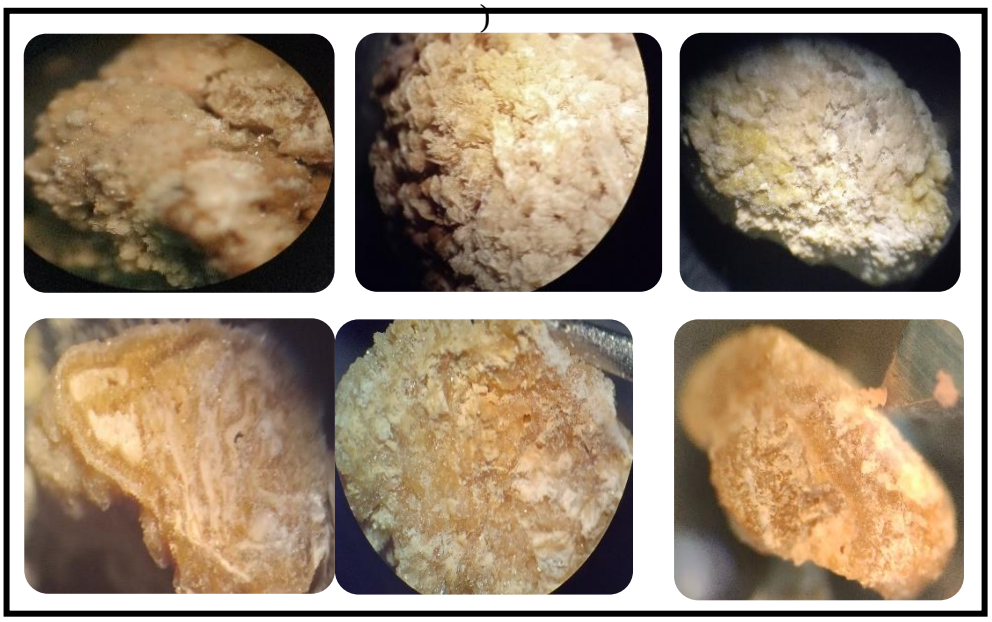


Figure 58 : Morphologies de l'association entre carbapatite et COD (IVa1+COD) : en surface (en haut) ; en section (en bas).

5 Conclusion

L'analyse morphologique des lithiases urinaires a permis d'obtenir une première classification macroscopique des échantillons selon des critères tels que la forme, la couleur, l'aspect de surface et l'organisation interne en couches. Ces observations ont révélé une grande diversité morphologique entre les calculs, reflétant probablement une pluralité de mécanismes de formation. L'identification de zones concentriques, de cœurs compacts ou friables, et de couches périphériques bien délimitées constitue une base précieuse pour orienter les analyses physico-chimiques ultérieures. Cette étape a ainsi permis de sélectionner les zones les plus représentatives ou les plus contrastées pour les analyses infrarouge et thermique. Bien que descriptive, l'analyse morphologique joue ici un rôle fondamental dans la compréhension structurale et évolutive des lithiases.

CHAPITRE III

CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES LITHIASES URINAIRES

1 Introduction

L'analyse spectroscopique et thermique constitue un outil essentiel dans la caractérisation des lithiases urinaires.

La spectroscopie infrarouge permet d'identifier les composants cristallins constituant les calculs urinaires à travers leurs signatures spectrales spécifiques. Cette approche est particulièrement pertinente pour différencier les lithiases pures des lithiases mixtes et pour mettre en évidence des signatures spectrales propres aux différentes pathologies lithiasiques.

Tandis que l'analyse thermique apporte des informations sur la stabilité et les transitions de phases des constituants. Elle a été effectuée pour confirmer la composition des échantillons, notamment le nombre de molécules d'eau de cristallisation dans les oxalates de calcium (monohydraté et dihydraté) et l'acide urique (anhydre et dihydraté). Deux techniques principales ont été utilisées :

- **Thermogravimétrie (TG) :** pour mesurer la perte de masse liée à la déshydratation et à la décomposition thermique des phases**.**
- **Analyse calorimétrique différentielle (DSC)** : Elle apporte des informations complémentaires sur les transitions de phase, telles que la fusion ou la cristallisation, et permet de caractériser la stabilité thermique des composants minéraux présents.

Dans ce chapitre, nous présenterons les protocoles expérimentaux adoptés pour les analyses FTIR et ATG-DSC, avant d'exposer les résultats obtenus et leur interprétation.

L'objectif est d'identifier et de caractériser les constituants des lithiases urinaires étudiées en mettant en évidence la complémentarité de ces approches pour une caractérisation précise des calculs urinaires.

L'analyse des échantillons a été réalisée au niveau de la plate-forme de la faculté de médecine d'Annaba.

2 Matériel

2.1 Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IR-TF)

2.1.1 Échantillons

- Tous les échantillons prélevés (105 calculs) et caractérisés morphologiquement sont analysés par la Spectrophotométrie infrarouge
- Des standards purs (oxalate de calcium monohydraté et dihydraté, calcite, phosphate de calcium carbonaté, brushite, struvite, acide urique anhydre et dihydraté, urate acide d'ammonium anhydre, cystine, amoxicilline), ainsi que leurs mélanges binaires et tertiaires préparés selon des proportions massiques définies, ont été utilisés pour constituer une bibliothèque spectrale de référence. L'ensemble des composés a été acquis auprès du fournisseur Sigma-Aldrich (annexe2).

2.1.2 Instrumentation

- Spectromètre IR-TF de type **IRAffinity-1S SHIMADZU®**, référence : A21965301249 LP;
- Accessoire ATR (Attenuated Total Reflectance) de type **QUEST – SPERAC,** avec un cristal en **ZnSe** (Séléniure de Zinc) ;
- Logiciel de traitement spectral Labsolutions IR version 2.12.

2.1.3 Outils de manipulation et de préparation

- Des outils de manipulation (Lame de bistouri n= 11, pincettes) et de nettoyage (éthanol, papier Josef) ont été employés pour préparer le cristal ZnSe et les échantillons;
- Mortier en agate pour le broyage des échantillons.

2.2 Analyse Thermique (DSC/TG)

2.2.1 Échantillons

- Les échantillons analysés par DSC/TG sont les prélèvements de lithiases urinaires récupérés après l'analyse spectroscopique infrarouge (FTIR) ;
- Les standards ayant servi à la constitution de la bibliothèque spectrale ont également été soumis à une analyse thermique, en complément de leur caractérisation infrarouge.

2.2.2 Instrumentation

- Balance analytique pour la pesée précise des échantillons et standards (SHIMADZU® AUW200D, affichage minimal : 0,0001 g) ;
- Un analyseur thermique différentiel (DSC) couplé à une thermobalance (TGA) de marque SETARAM LABSYS™ evo a été utilisé. Ses caractéristiques techniques sont les suivantes :

  - Four à montée en température contrôlée ;
  - Balance de thermogravimétrie (TGA) : capacité maximale de 20 g ;
  - Cannes de mesure : combinaison TGA/DSC ;
  - Plage de température : de la température ambiante jusqu'à 1600 °C ;
  - Vitesse de chauffage : de 0,01 à 100 °C/min.

- Logiciel de gestion Calisto version 1.38 ;
- Logiciel d'analyse des données Processing version 1.42;
- Atmosphère contrôlée Azote (N_2) comme atmosphère inerte, débit de 40mL/min.

2.2.3 Accessoires

- Creusets en alumine 90 ml pour TG et DSC;
- Outils de prélèvement : Scalpel stérile et pince fine.

3 Méthodes

Cette section détaille les procédures expérimentales, étape par étape.

3.1 Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IR-TF)

3.1.1 Étape pré-analytique

3.1.1.a Vérification des performances du spectrophotomètre FTIR SHIMADZU

Une vérification des performances du spectromètre a été effectuée avant son utilisation dans le cadre de cette étude, conformément au protocole du fabricant.

- **Étalonnage du nombre d'onde :** Assurer que l'axe optique et les composants de l'interféromètre sont bien alignés pour éviter toute dérive spectrale.

Utilisation d'un film standard en polystyrène (38 µm conforme à la Pharmacopée JP9).

- Vérification des pics caractéristiques : 3060, 2849, 1601, 1028, 906 cm^{-1}), ce qui traduit la validation de performance de l'échelle de nombre d'onde (Tab 18).

Tolérance : ±0,5 cm^{-1} pour confirmer l'exactitude de l'échelle spectrale**.**

Tableau 18 . Test de performance de l'échelle de nombre d'onde de notre spectrophotomètre sur film de polystyrène

Pic attendu (cm^{-1})	Pic mesuré (cm^{-1})	Écart (cm^{-1})	Critère d'acceptation (JP 9)	Conformité
3060,2	3060,3	+0,1	±0,5 cm^{-1}	Oui
2849,5	2849,6	+0,1	±0,5 cm^{-1}	Oui
1601,2	1601,0	-0,2	±0,3 cm^{-1}	Oui
1028,1	1028,2	+0,1	±0,3 cm^{-1}	Oui
906,6	906,5	-0,1	±0,3 cm^{-1}	Oui

Tous les mesures respectent les critères de la Pharmacopée Japonaise (JP 9) pour l'étalonnage du nombre d'onde, avec des écarts inférieurs à ±0,5 cm^{-1} (4000–2000 cm^{-1}) et ±0,3 cm^{-1} (2000–400 cm^{-1}). L'instrument est conforme pour une utilisation dans des analyses spectrales.

- **Résolution spectrale :** Garantir une distinction claire entre les pics spectraux proches.

- Analyse d'un étalon de polystyrène pour observer la séparation des bandes à 1583 cm^{-1} et 1601 cm^{-1}, en calculant la différence d'absorbance aux critères d'acceptation précisés par la Ph.JP.9.0. (Tab 19)
- Critère : Une vallée d'absorbance inférieure à 10 % du pic le plus faible, confirmant une résolution optimale de l'appareil.
- Condition acceptable : Une séparation nette entre les bandes, validant le bon fonctionnement de l'équipement.

Tableau 19: Test de performance de la résolution spectrale de notre spectrophotomètre sur film de polystyrène

Pourpoint	Dimensions mesurées (cm^{-1})	Différence (cm^{-1})	Absorbance des pics	Absorbance de la vallée	Critère d'acceptation (JP 9)	Conformité
~2849 cm^{-1}	2850,5-2849,5	1,0	0,80, 0,75	0,07	Vallée < 10 % (0,075)	Oui
~1583 cm^{-1}	1589, 1583	6,0	0,70, 0,65	0,06	Vallée < 10 % (0,065)	Oui

Les doublets à 2849 cm^{-1} et 1583 cm^{-1} satisfont les critères de la Pharmacopée Japonaise (JP 9) pour la résolution spectrale, avec des vallées d'absorbance Inférieures à 10 % des pics les plus faibles. Notre appareil est conforme pour une utilisation dans des analyses spectrales.

- **Niveau de bruit (signal/bruit, S/N)**

Vérification de la stabilité du signal avec une source de lumière infrarouge et vérification de l'intensité de la source IR et de la sensibilité du détecteur afin de vérifier la détection des composés minoritaires dans les calculs.

Critères d'acceptation

- **S**/N ≥ 30 000:1.
- Bruit pic-à-pic < 0,000033 absorbance

a) Mesure du bruit (spectre vide)

- Région : 2200-1900 cm^{-1}.
- Calculer l'amplitude du bruit pic-à-pic (différence entre le maximum et le minimum dans cette région).
- Données fictives (en absorbance) sur 10 points dans cette plage :

Tableau 20 . Mesure du bruit

Point	Absorbance (A)
1	0,000008
2	0,000012
3	0,000006
4	0,000010
5	0,000015
6	0,000004
7	0,000013
8	0,000007
9	0,000011
10	0,000005

- **Amplitude pic-à-pic**
  - Maximum = 0,000015 A.
  - Minimum = 0,000004 A.
  - Bruit = 0,000015 - 0,000004 = 0,000011 A.

Vérification : Le bruit pic-à-pic (0,000011 A) est inférieur au critère d'acceptation (< 0,000033 A).

b) Mesure du signal (polystyrène)

- Pic choisi : 1601 cm^{-1} (vibration C=C).
- Spectre enregistré avec film de polystyrène standard.

Tableau 21 . Données fictives (en absorbance) autour du pic

Nombre d'onde (cm^{-1})	Absorbance (A)
1590	0,060
1595	0,210
1601	0,480
1605	0,310
1610	0,090

- **Amplitude du signal** :
  - Maximum au pic = 0,480 A.
  - Base (moyenne hors pic, ex. 1590-1610 cm^{-1}) = (0,060 + 0,090) / 2= 0,075 A.
  - Signal = 0,450 - 0,075 = **0,405 A**.

Calcul du S/N

- S/N = Signal / Bruit = 0,405 / 0,000011 = 36 818:1**.**
- Le S/N (36 818:1) est supérieur au critère d'acceptation (≥ 30 000:1). Critère satisfait.

Les deux critères d'acceptation sont entièrement satisfaits, confirmant que notre appareil présente une performance optimale pour la détection des composés minoritaires, comme ceux rencontrés dans l'analyse des lithiases urinaires.

- **Reproductibilité** : s'assurer que les spectres obtenus pour un même échantillon sont identiques dans des conditions répétées**.**

- Analyse répétée (n=6) d'un échantillon de référence pour lithiase urinaire Calcite pure

La calcite pure présente trois bandes IR principales dans la région 4000-400 cm^{-1} :

- **1430 cm^{-1}** : Vibration asymétrique de C-O (forte intensité).

- **875 cm^{-1}** : Déformation hors plan de CO_3^{2-} (moyenne intensité).
- **712 cm^{-1}** : Déformation dans le plan de CO_3^{2-} (faible intensité)

Superposition des spectres obtenus sur 6 mesures consécutives.

- Calcul de l'écart-type relatif (RSD) des intensités de pics principaux.
- Acceptabilité : - coefficient de variation <1% sur les intensités mesurées.

- Intensité des pics : Écart-type relatif (σ/moyenne) < 5 % (variation acceptable pour l'absorbance).

Tableau 22 . Test de performance de la reproductibilité spectrale de notre spectrophotomètre sur un échantillon de référence (Calcite pure).

Mesure	Pic 1 (cm^{-1})	Absorbance (Pic 1)	Pic 2 (cm^{-1})	Absorbance (Pic 2)	Pic 3 (cm^{-1})	Absorbance (Pic 3)
1	1429,8	1,250	874,5	0,620	711,9	0,310
2	1430,2	1,230	875,0	0,615	712,1	0,305
3	1429,6	1,260	874,8	0,630	712,0	0,315
4	1430,0	1,245	874,7	0,625	711,8	0,308
5	1430,1	1,255	875,1	0,618	712,2	0,312
Moyenne	1429,9	1,248	874,8	0,622	712,0	0,310
Écart-type (σ)	0,23	0,011	0,22	0,005	0,15	0,004
σ relatif (%)	-	0,88 %	-	0,80 %	-	1,29 %

✓ **Position des pics (cm^{-1})**

- Pic 1 (1430 cm^{-1}) : Moyenne = 1429,9 cm^{-1}, σ = 0,23 cm^{-1}.
- Pic 2 (875 cm^{-1}) : Moyenne = 874,8 cm^{-1}, σ = 0,22 cm^{-1}.
- Pic 3 (712 cm^{-1}) : Moyenne = 712,0 cm^{-1}, σ = 0,15 cm^{-1}.

Les écarts-types sont tous < 1 cm^{-1}. La position des pics est très reproductible, indiquant une excellente stabilité de l'interféromètre et de la source IR. Ce qui permet de distinguer la calcite (carbonate) de l'oxalate (~1620 cm^{-1}), même dans des mélanges.

✓ **Intensité des pics (absorbance)**

- Pic 1 : Moyenne = 1,248, σ = 0,011, σ relatif = 0,88 %.

- Pic 2 : Moyenne = 0,622, σ = 0,005, σ relatif = 0,80 %.
- Pic 3 : Moyenne = 0,310, σ = 0,004, σ relatif = 1,29 %.

Les écarts relatifs sont tous < 5 %, avec des valeurs très faibles (< 1,3 %), montrant une constance remarquable de l'intensité mesurée. Cela reflète une bonne stabilité du détecteur (DLATGS) et un rapport S/N élevé**.** Ce qui garantit que des composés minoritaires (ex. 5 % de calcite dans un calcul) seront détectés de manière répétable.

3.1.1.b Constitution de la bibliothèque de référence

Une bibliothèque de standards purs et de mélanges binaires et tertiaires a été créée pour faciliter l'identification des échantillons réels.

Préparation

- **Standards purs** : Des échantillons à 100 % de chaque composé pur ont été préparés pour les substances suivantes : COM, COD, AU0, AU2, UR, CARB, STR, BRUSH, CALCITE, CYSTINE, AMOXICILLINE.
- **Mélanges binaires** : Les mélanges binaires, composés de deux standards chimiques combinés dans des proportions variées, sont détaillés dans le tableau suivant.

- **Mélanges tertiaires** : Les mélanges tertiaires, combinant trois standards chimiques dans différentes proportions, sont présentés dans le tableau suivant.
- Les mélanges physiques ont été finement homogénéisé par mortier en agate.

3.1.1.c Analyse des échantillons

Préparation des échantillons

- Déterminer les zones à analyser : Chaque partie représentative de la composition du calcul est analysée séparément.
  - Un prélèvement de la périphérie et de la surface (correspondant à la cristallisation la plus récente) ;
  - Un autre prélèvement du noyau ou de la partie centrale du calcul (en absence de noyau repérable),
  - Si la structure interne est hétérogène, un troisième ;

- Les prélèvements ont été finement broyé et homogénéisé par mortier en agate ;

  - L'allumage de l'appareil a été fait 30 minutes au moins avant l'analyse pour stabiliser la source IR;

- Nettoyage préalable du cristal : éthanol ou bien isopropanol 96 %, séchage;
- Lancer l'analyse du background afin qu'il soit retranché du spectre d'échantillon
- Placement direct des standards et des échantillons, sur le cristal ZnSe (une masse suffisante pour couvrir le cristal de détection, de l'ordre du mg);
- Ensuite, une pression contrôlée est appliquée aux standards à l'aide d'un système de presse afin d'assurer un contact optimal avec le cristal ATR.

3.1.2 Étape analytique

3.1.2.a Conditions d'analyse

- Plage spectrale : 4000–400 cm^{-1};
- Résolution : 16 cm^{-1};
- Nombre de scans : 45 par spectre (mesure du Background, standards, échantillons);
- Nombre de spectres enregistrés par échantillon : 6.

3.1.3 Étape post-Analytique

3.1.3.a Traitement des spectres

- Correction de l'atmosphère : qui permet d'éliminer les absorbances parasites (H_2O et CO_2) ;
- Un lissage de type Savitzky-Golay a été appliqué avec une fenêtre de 5 points, pour réduire le bruit des spectres tout en préservant l'existence et la largeur des pics.

3.1.3.b Identification des composés

- Comparaison avec la bibliothèque via le logiciel Labsolutions IR;
- Critère : indice de similarité > 90%.;
- Bandes caractéristiques : exemple : oxalate (1312 cm^{-1}), phosphates (1120 cm^{-1}), selon les spectres de littérature ;
- Les **spectres FTIR** obtenus pour chaque échantillon ont été exportés sous forme numérique (txt);
- L'ensemble des spectres a été organisé dans un fichier Excel, préparé pour l'analyse chimiométrique (chapitre 4).

3.2 Analyse Thermique (DSC/TG/ATD)

3.2.1 Étape pré-Analytique

3.2.1.a Vérification des performances de l'analyseur thermique SETARAM LABSYS™ evo:

Les calculs urinaires, comme l'oxalate de calcium monohydraté ($CaC_2O_4 \cdot H_2O$), subissent une déshydratation (150-200 °C). Le $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ sert de modèle pour valider la capacité de l'appareil à détecter ces transitions similaires.

Les critères d'évaluation des performances sont établis conformément aux normes d'analyse thermique et aux spécifications du fabricant

- **Étalonnage de la température :** Afin de vérifier l'exactitude du capteur de température de la DSC.

Une vérification de la température a été effectuée à l'aide du $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, un standard de référence. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 23 . Vérification des performances de la température du DSC sur $CuSO_4 \cdot 5\ H_2O$

Matériau	Masse relative	Programme de température	T° de de déshydratation mesuré	Les températures de déshydratation [205]	Conformité
$CuSO_4$. $5H_2O$	249.68 g/mol	Ambiante – 900°C A 10 °C/min	101.2 °C 241.6 °C	~100 °C et ~240 °C	Oui

Les écarts 1,2 °C entre 101,2 °C (mesuré) et ~100 °C (attendu) et 1,6 °C entre 241,6 °C (mesuré) et ~240 °C (attendu), tous deux <5 %.

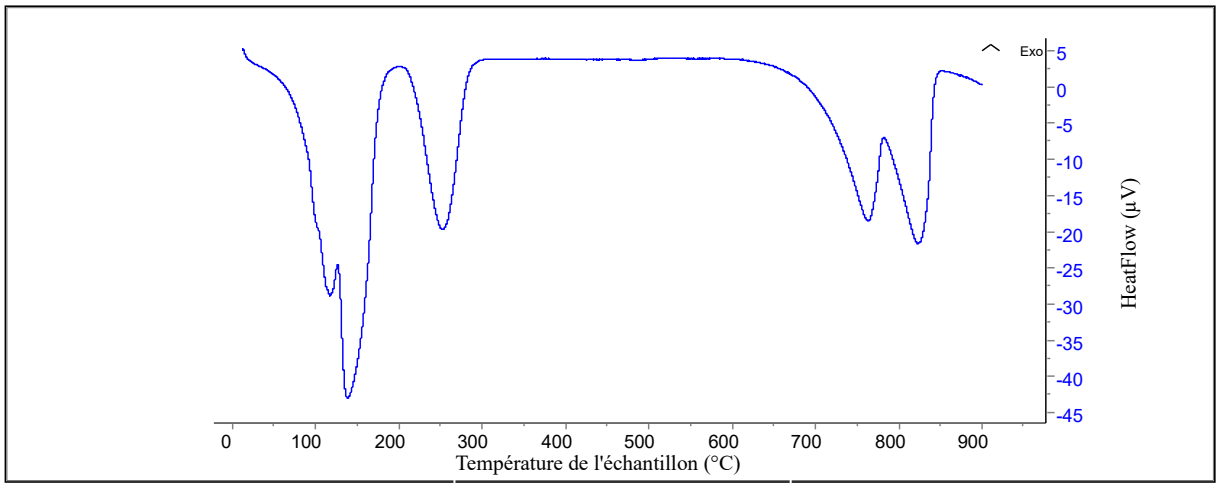


Figure 59 : Thermogramme DSC du $CuSO_4 \cdot 5\ H_2O$

- **Sensibilité de la balance (TGA)**

Le thermogramme de CuSO4 · 5 H_2O est présenté dans la figure suivante :

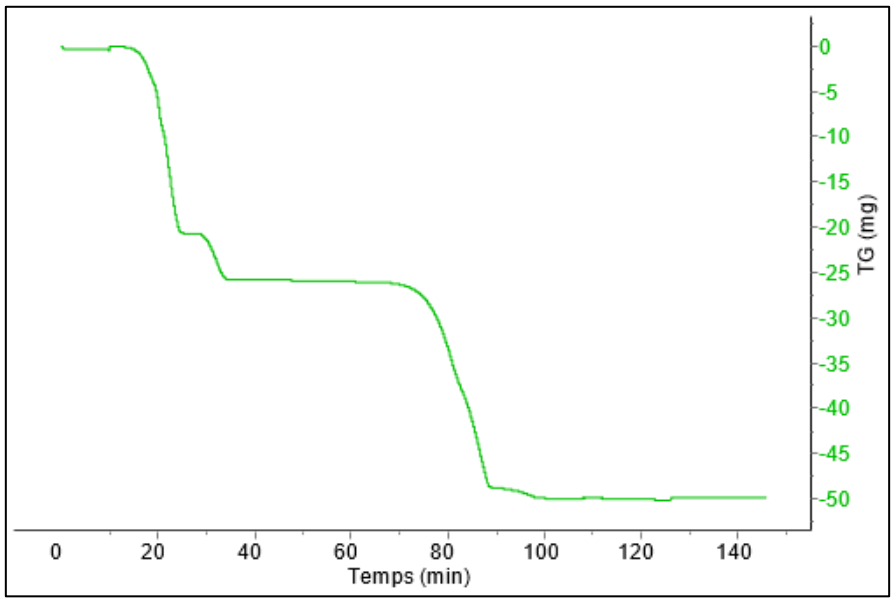


Figure 60 : Thermogramme ATG du $CuSO_4$ · 5 H_2O

La perte de masse théorique :

4H_2O = 72 g/mol (4 × 18) sur 249,68 g/mol (masse molaire de $CuSO_4$·5H_2O) ≈ 28,8 %.

1H_2O = 18 g/mol ≈ 7,2 % supplémentaire.

Vérifier si l'appareil mesure ces pourcentages avec une erreur < 0,5 %

Tableau 24 . Vérification des performances du TGA sur $CuSO_4$ · 5 H_2O

Matériau	Masse relative	Programme de température	Perte de masse mésurée (mg)	Perte de masse théorique (mg)	Conformité
$CuSO_4$, 5H_2O	249.68 g/mol	Ambiante – 900°C A 10°C/min	28.83% (50-150) 7.11% (150-300 °C)	28.83 % 7.2%	**Oui**

Écarts entre la perte de masse théorique et mésurée : 0% et -0.09% (7.2-7.11), tous deux < 0,5 %.

- **Sensibilité calorimétrique (DSC) :**

- Une faible sensibilité produirait des pics aplatis ou indétectables.
- Les pics endothermiques (FIG 60) de déshydratation sont nets et bien définis.

- **Répétabilité et reproductibilité des analyses thermiques**

Afin de vérifier que les courbes thermiques obtenues sont reproductibles.

- Analyse de 5 échantillons de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ de 10 mg (±0,1 mg)
- Plage de température : 25 °C à 300 °C (pour couvrir les deux déshydratations).
- Taux de chauffe : 10 °C/min.
- Superposition des courbes DSC et TGA pour comparer les transitions thermiques.
- Critère d'acceptation :
  - Écart-type sur la température de transition <1°C.
  - Écart sur la perte de masse dans TGA <1%

Tableau 25 . Test de performance de la reproductibilité thermique de notre analyseur thermique sur un échantillon de référence ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$).

Mesure	T° de transition(°C) Étape 1	Perte de masse (%) Étape 1	T° de transition (°C) Étape 2	Perte de masse (%) Étape 2
1	**108,5**	**28,7**	**238,2**	**7,1**
2	**109,0**	**28,9**	**237,8**	**7,2**
3	**108,7**	**28,6**	**238,5**	**7,0**
4	**109,2**	**28,8**	**238,0**	**7,3**
5	**108,9**	**28,7**	**237,9**	**7,1**
Moyenne	**108,9**	**28,7**	**238,1**	**7,1**
Σ	**0,3**	**0,1**	**0,3**	**0,1**

Les écarts-types calculés (0,3 °C pour les températures de transition et 0,1 % pour les pertes de masse) sont bien inférieurs aux critères d'acceptation (< 1 °C et < 1 %).
Ces écarts faibles confirment une excellente reproductibilité. Donc l'instrument est fiable pour des analyses précises, comme celles des lithiases urinaires.

- **Stabilité de la ligne de base**

La ligne de base dans une analyse thermique (TGA ou DSC) représente le signal mesuré par l'instrument en l'absence de transitions physiques ou chimiques dans l'échantillon. Elle doit être une droite horizontale (ou légèrement inclinée de manière prévisible) sans dérive, bruit excessif ou fluctuations aléatoires.

Une ligne de base stable garantit que :

- Les variations détectées (pertes de masse en TGA, pics en DSC) sont dues à l'échantillon et non à des artefacts de l'instrument.

- Les mesures quantitatives (ex. perte de masse, enthalpie) sont précises et reproductibles.

- Mesure sans échantillon (creuset vide) sur la plage 25-800 °C 10 C°/min sous N_2 à 40ml/min. puis stabilisation à 800 °C pendant 30 minutes.
- Critères d'acceptation

- **TGA**
  - Bruit : < ±1 µg pendant le chauffage et la stabilisation.
  - Dérive totale : < 10 µg
- **DSC**
  - Bruit : < ±0,01 mW.
  - Dérive totale : < 0,1 mW

a. TGA : Masse apparente

Le tableau suivant présente l'évolution de la masse apparente mesurée sans échantillon pour évaluer la stabilité de la ligne de base.

Tableau 26 . Stabilité de la ligne de base pour l'ATG

Temps (min)	Température (°C)	Masse (mg)	Observation
0	25	0,000	Début, taré
10	125	0,001	Bruit léger
20	225	0,002	Dérive progressive
40	425	0,004	Dérive continue
60	625	0,006	Stabilité relative
77,5	800	0,008	Fin du chauffage
87,5	800 (stab. 10 min)	0,009	Stabilisation en cours
97,5	800 (stab. 20 min)	0,009	Stable
107,5	800 (stab. 30 min)	0,010	Fin, dérive totale : 0,010 mg

Pendant le chauffage (25-800 °C)

- Bruit : ±0,001 mg (acceptable, < ±1 µg).
- Dérive : +0,008 mg sur 775 °C (soit ~ 0,0103 µg/°C), inférieure à 10 µg, donc conforme.

Pendant la stabilisation (800 °C, 30 min)

- Bruit : ±0,001 mg.
- Dérive : +0,002 mg sur 30 min (soit ~0,067 µg/min)

La ligne de base TGA est stable, avec une dérive totale de 0,010 mg (10 µg) sur l'ensemble du test, ce qui est acceptable pour une plage aussi grande.

c) DSC : Flux de chaleur

Le tableau suivant présente l'évolution de flux de chaleur mesurée sans échantillon pour évaluer la stabilité de la ligne de base.

Tableau 27 . Stabilité de la ligne de base pour la DSC

Temps (min)	Température (°C)	Flux de chaleur (mW)	Observation
0	25	0,00	Début, stable
10	125	0,01	Bruit léger
20	225	0,02	Dérive légère
40	425	0,03	Dérive progressive
60	625	0,05	Stabilité relative
77,5	800	0,07	Fin du chauffage
87,5	800 (stab. 10 min)	0,08	Stabilisation en cours
97,5	800 (stab. 20 min)	0,08	Écurie
107,5	800 (stab. 30 min)	0,09	Fin, dérive totale : 0,09 mW

Pendant le chauffage (25-800 °C)

- Bruit : ±0,01 mW (acceptable).
- Dérive : +0,07 mW sur 775 °C (soit ~0,00009 mW/°C), bien en-dessous de 0,1 mW.

Pendant la stabilisation (800 °C, 30 min)

- Bruit : ±0,01 mW.
- Dérive : +0,02 mW sur 30 min (soit ~0,00067 mW/min), négligeable.

La ligne de base DSC est stable, avec une dérive totale de 0,09 mW, inférieure au seuil de 0,1 mW.

Les deux techniques montrent un bruit et une dérive dans les limites acceptables, même sur une plage étendue à 800 °C et avec une longue stabilisation. Cela indique que l'instrument est bien calibré et stable dans des conditions extrêmes.

3.2.1.b Étape Analytique

- **Constitution de la bibliothèque de référence**

Les échantillons de la bibliothèque spectrale, préalablement caractérisés par spectroscopie infrarouge, ont été soumis à une analyse thermique par TG et DSC afin d'établir leurs profils thermiques de référence.

- **Préparation**
  - Standards purs : 100% ;
  - Mélanges binaires : 20 :80 / 50 :50 / 80 :20.

- **Analyse des échantillons**

- **Préparation**

- Pour garantir des résultats thermiques robustes et reproductibles, seuls les échantillons présentant une masse comprise entre 5 et 10 mg ont été sélectionnés pour l'analyse thermique. Cette plage de masse a été choisie pour minimiser les incertitudes liées à l'hétérogénéité des échantillons ou aux effets de surface, tout en optimisant la qualité des données,
- Les échantillons de masse inférieure à 5 mg ont été exclus de l'analyse thermique afin de réduire les variations expérimentales potentielles et d'assurer une meilleure homogénéité des résultats.
- Récupération des prélèvements déjà analysés par FTIR , sans préparation supplémentaire
- Entre trois et cinq échantillons ou prélèvements de même composition, préalablement identifiés par FTIR, ont été sélectionnés pour l'analyse thermique. Cette approche multi-échantillons vise à confirmer la cohérence des tendances observées, à réduire les erreurs dues aux variations expérimentales et à valider les résultats spectroscopiques par une méthode complémentaire.
- Pesée des échantillons : [5–10 mg] dans les creusets.

- **Conditions d'analyse**

La principale condition instrumentale à maitriser est la température. Pour les analyses réalisées, les conditions thermiques sont :

- ✓ Température initiale : ambiante à 25°C
- ✓ Température finale : 900°C
- ✓ Vitesse de chauffe : 10°C/min

3.2.1.c Étape post-Analytique

- **Acquisition et analyse des courbes thermiques**

- Identification des transitions thermiques caractéristiques
- Évaluation des pertes de masse associées aux transformations physico-chimiques
- Comparaison avec les références de la bibliothèque.

- **Validation des résultats**

- Les compositions identifiées par analyse thermique ont été comparées aux résultats de la spectroscopie infrarouge pour valider la cohérence des données. Une attention particulière a été portée à la distinction entre l'oxalate de calcium monohydraté et dihydraté, en s'appuyant sur les pertes de masse spécifiques à la déshydratation

4 Résultats et discussions

Les résultats combinent la spectroscopie infrarouge (SPIR) et l'analyse thermique (TG, DSC, DTG) pour caractériser les lithiases urinaires, en s'appuyant sur une bibliothèque de référence de standards purs et mélanges.

Les spectres et thermogrammes des échantillons ont été comparés à ceux de la bibliothèque à l'aide d'un logiciel d'analyse Labsolutions IR et Processing, fournissant des scores de corrélation supérieurs à 90 %, seuil retenu pour valider la composition chimique et cristalline.

Il est très important d'avoir caractérisé les phases majoritaires pures au préalable afin de pouvoir déconvoluer les spectres. Les résultats sont présentés par types morphologiques, en commençant par l'oxalate de calcium (whewellite COM et weddellite COD), suivis d'un tableau synthétique pour chaque catégorie.

4.1 Oxalate de calcium (COM et COD)

4.1.1 Analyse des échantillons réelles oxaliques

Les 105 échantillons de lithiases urinaires ont été analysés par FTIR pour confirmer leur composition cristalline, en lien avec leur classification morphologique détaillée dans le chapitre 2 (Type I pour COM, Type II pour COD, et mélanges COM+COD).

Chaque type inclut des sous-types morphologiques décrits précédemment (ex. : Ia, Ib,Ic,Id et Ie pour COM ; IIa, IIb et IIc pour COD), illustrés par des photographies (Figures 44 à 51, chapitre 2).

Compte tenu du grand nombre d'échantillons (35 pour Type I, 8 pour Type II, 9 pour mélanges COM+COD), les spectres FTIR ont été regroupés par type principal, et des spectres représentatifs ont été sélectionnés pour illustrer les caractéristiques spectrales dominantes.

Ces spectres ont été superposés aux standards COM, COD, et COM+COD pour valider la correspondance compositionnelle.

4.1.1.a Oxalate de calcium monohydraté

- **Spectroscopie infrarouge (SPIR)**

Les 35 échantillons classés comme Type I (47,6 % de l'ensemble) présentent des spectres cohérents avec la composition en oxalate de calcium monohydraté (COM).

Afin de visualiser les différences éventuelles entre les sous-types morphologiques identifiés précédemment, une superposition des spectres représentatifs de chaque sous-type avec le standard de référence est présentée dans la Figure suivante.

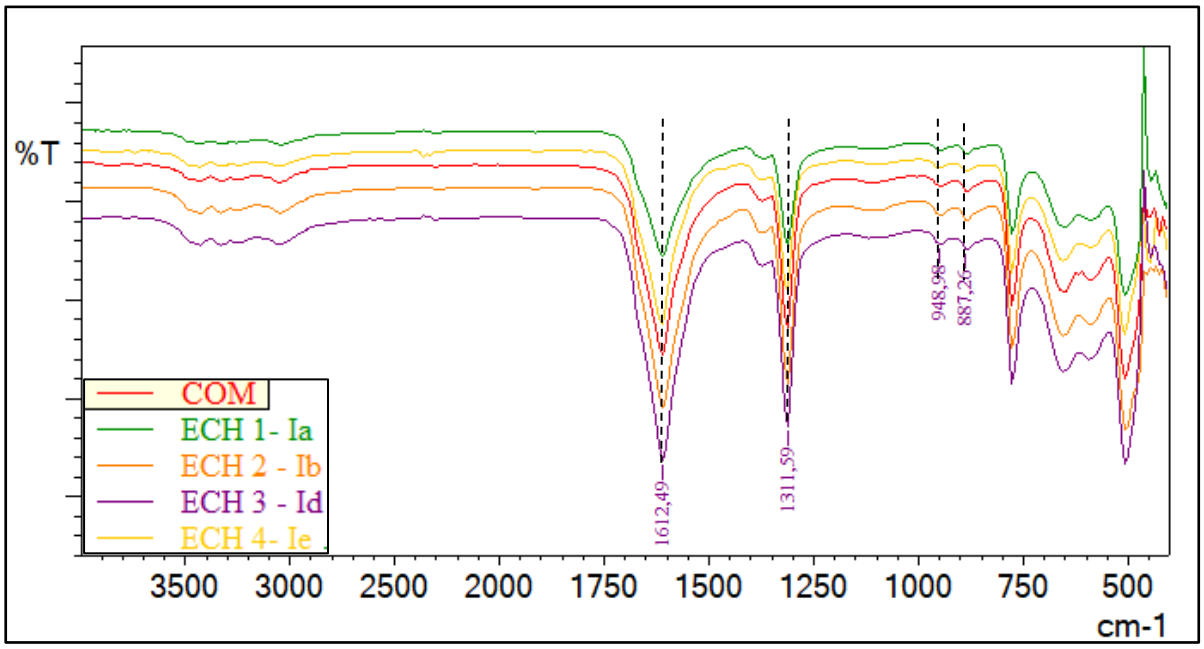


Figure 61 : Superposition des spectres FTIR des échantillons avec les standards COM et COD

Les spectres montrent une forte similitude avec la référence COM, avec des bandes caractéristiques bien définies autour de 1612 cm^{-1} (νC=O) et 1311 cm^{-1} (νC-O). Le score de corrélation moyen avec COM est de 92,4 % (± 1,8 %)

Parmi les sous-types morphologiques décrits dans le chapitre 2 (ex. : Ia, Ib, Id, Ie), aucune variation significative des bandes principales n'a été observée, suggérant une homogénéité chimique malgré les différences morphologiques.

- **Analyse thermique (TG+DSC)**

La Figure 69-70 montre la superposition des thermogrammes des sous-types COM avec la référence standard. Tous les échantillons COM analysés présentent une transition thermique similaire à celle du standard, confirmant leur stabilité thermique et leur structure cristalline.

Une perte de masse moyenne de 12,1 % (± 0,3 %) entre 150 et 250 °C est associée à un pic endothermique DSC à 175-185 °C (± 5 °C) et un maximum DTG à 180 °C, correspondant à la

déshydratation de $CaC_2O_4 \cdot H_2O$. Une perte de 19,1 % (± 0,3 %) entre 400 et 500 °C est marquée par un pic exothermique DSC à 448-452 °C (± 3 °C), liée à la décomposition en $CaCO_3$. Une perte de 26,0 % (± 0,4 %) entre 750 et 850 °C est associée à un pic endothermique DSC à 810 °C (± 5 °C), correspondant à la décarbonatation en CaO

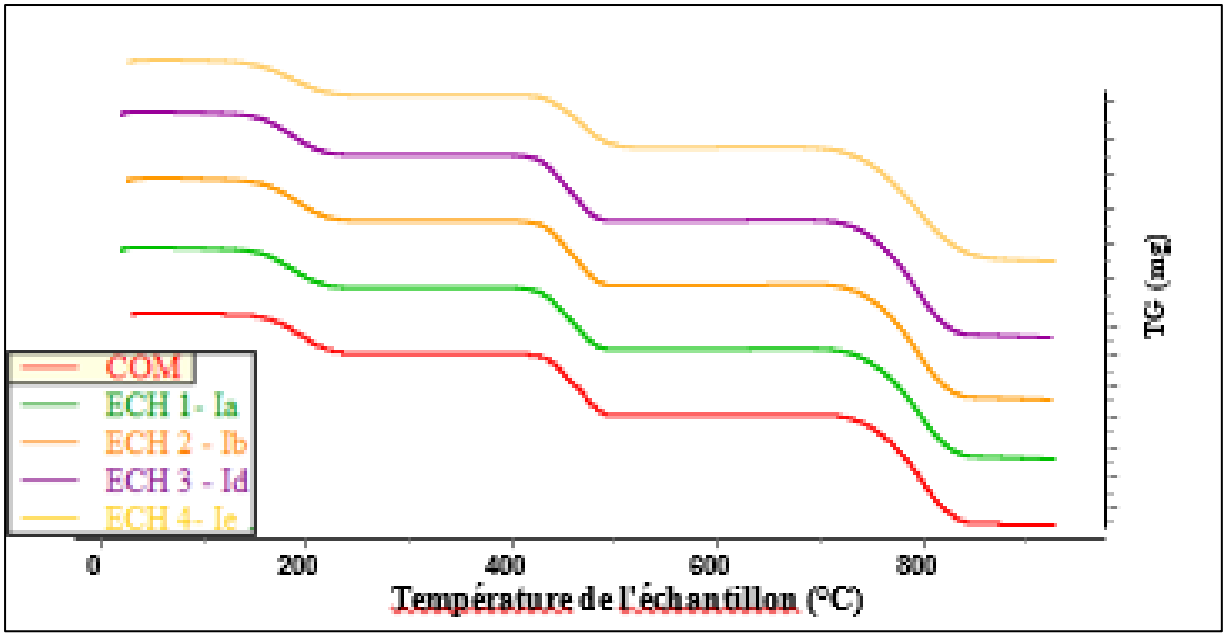


Figure 62 : Superposition des thermogrammes DSC des sous-types COM avec le standard.

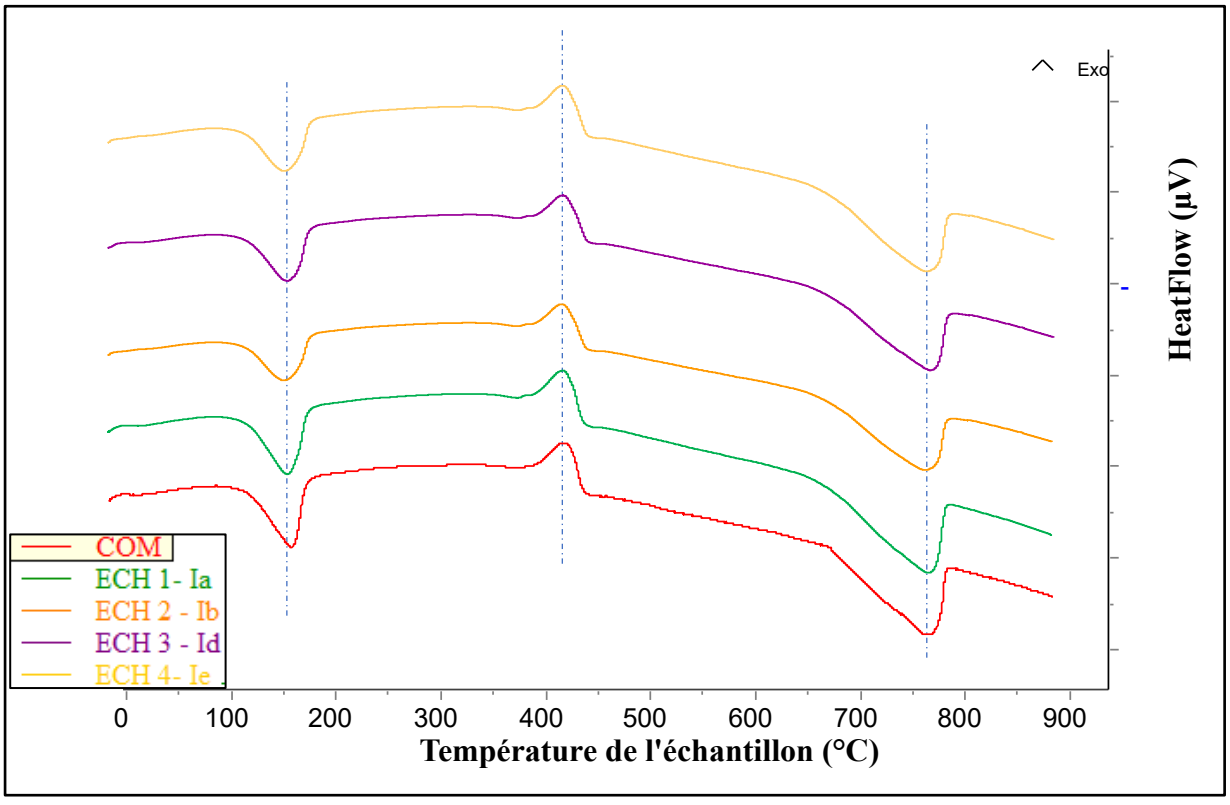


Figure 63 : Superposition des thermogrammes DSC des sous-types COM avec le standard

Les résultats confirment les caractéristiques des calculs de type I (Figure 43 à 48, chapitre 2).

4.1.1.a Oxalate de calcium dihydraté :

- **Spectroscopie infrarouge (SPIR) :**

Les 8 échantillons classés comme Type II (19,0 % de l'ensemble) présentent des spectres typiques de l'oxalate de calcium dihydraté (COD).

La Figure 71 présente la superposition des spectres FTIR représentatifs des sous-types COD avec le standard de référence.

Elle montre des bandes à 1319 cm^{-1} et 1620 cm^{-1}, accompagnées d'une bande distinctive à 918 cm^{-1} (vibration de l'eau de cristallisation) et d'une bande large à ~3400 cm^{-1} (élongation O-H).

Le score de corrélation moyen avec COD est de 93,6 % (± 2,1 %)

Les sous-types morphologiques (ex. : IIa, IIb) ne révèlent pas de différences spectrales notables

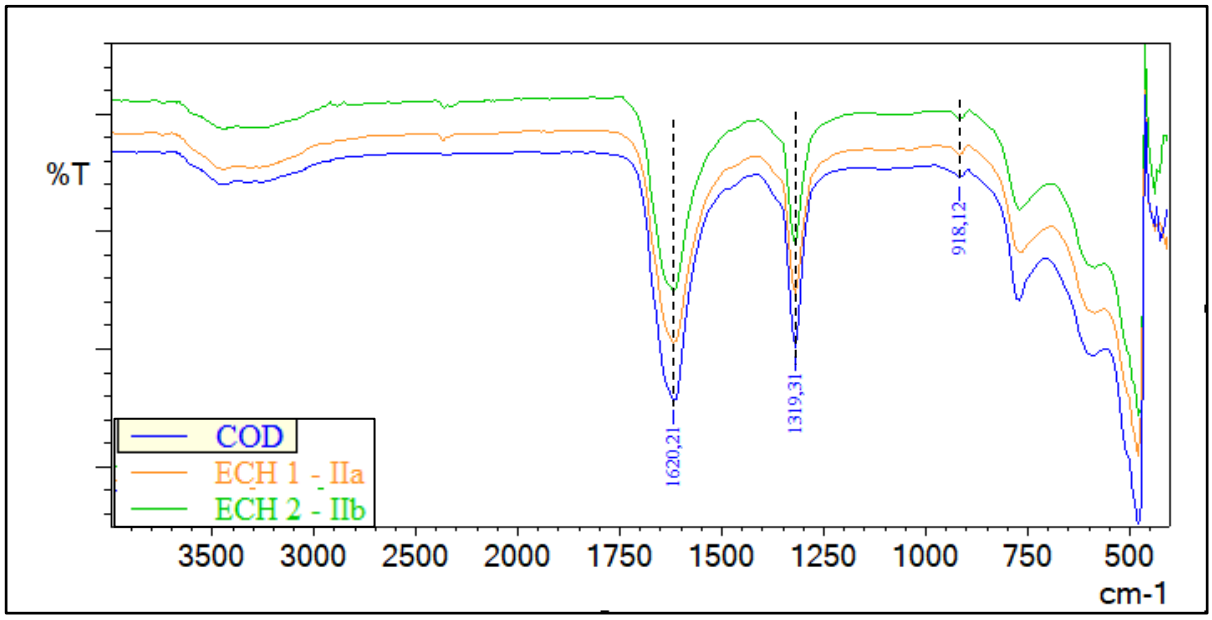


Figure 64 : Superposition des spectres FTIR représentatifs des sous-types COD avec le standard.

- **Analyse thermique (TG+DSC+DTG)**

Les Figures 72-73 présentent la superposition des thermogrammes DSC/TGA des sous-types COD avec le standard COD.

Tous les échantillons montrent une déshydratation en deux étapes correspondant à l'élimination de l'eau de cristallisation : 13,6 % (±0,3 %) entre 120 et 190 °C (pic DSC endothermique à 174 ± 3 °C) et 9,0 % (±0,2 %) entre 190 et 290 °C (pic DTG à 209 ± 3 °C), totalisant 22,6 % (±0,4 %).

Une perte de 16,6 % (±0,3 %) entre 390 et 490 °C est associée à un pic exothermique DSC à 475 ± 3 °C.

Une perte de 23,1 % (±0,4 %) entre 590 et 840 °C est marquée par un pic endothermique DSC à 798 ± 5 °C.

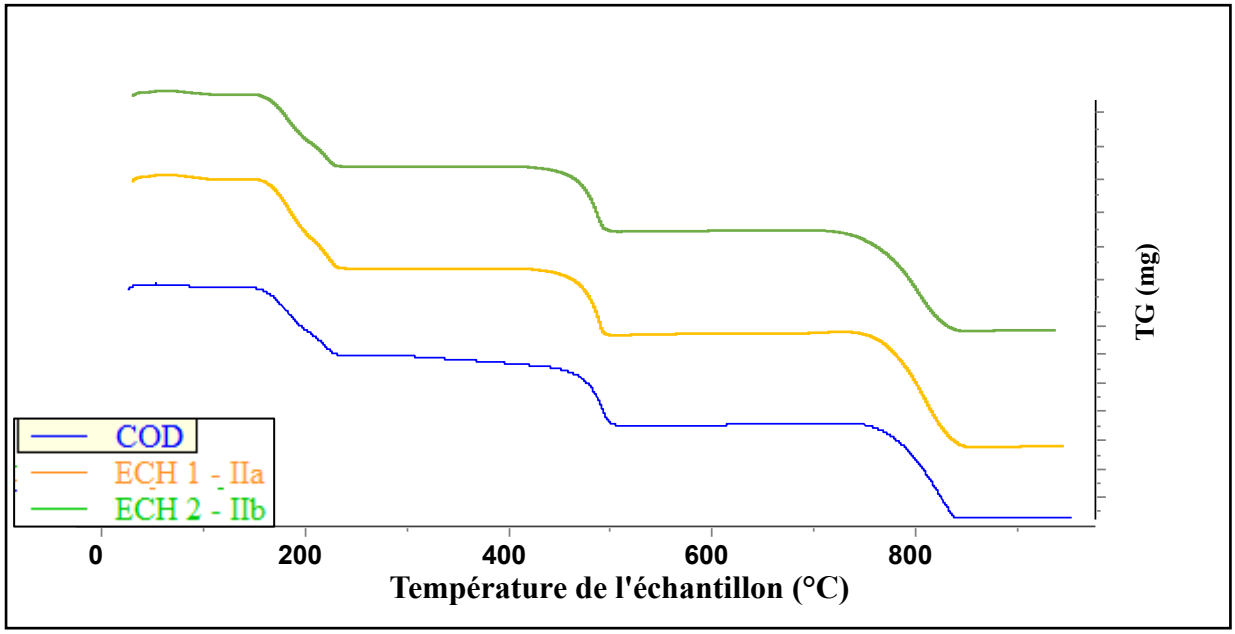


Figure 65 : Superposition des thermogrammes TGA des échantillons de sous-types COD avec le standard

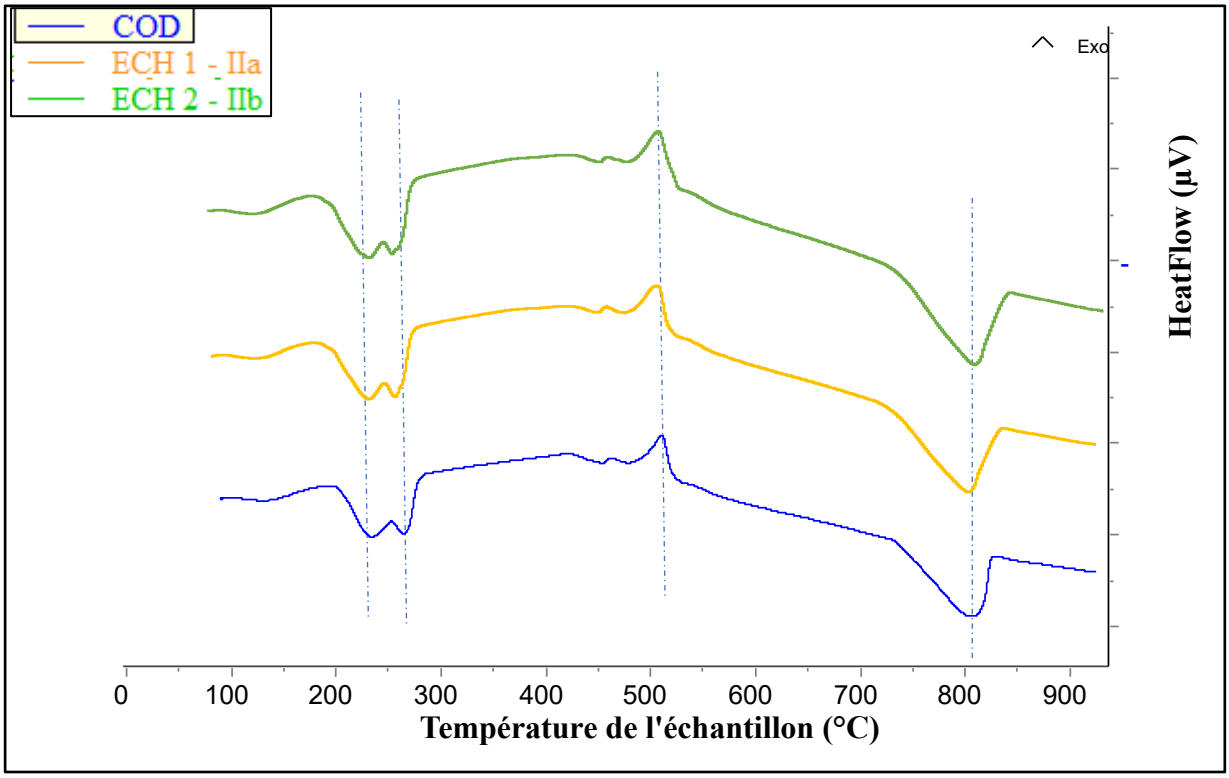


Figure 66 : Superposition des thermogrammes DSC des échantillons de sous-types COD avec le standard

Les résultats confirment les caractéristiques des calculs de type II (Figure 49, chapitre 2).

4.1.1.b Mélange COM+COD

- **Spectroscopie infrarouge (FTIR)**

Les 9 échantillons classés comme mélanges COM+COD (10,5 % de l'ensemble) ont été analysés par FTIR. Selon l'analyse morphologique, Ces mélanges se présentent sous trois formes distinctes **(Figures 74-77)** :

- Mélange de surface avec deux zones distinctes (zone 1(Z1) = COM, zone 2 (Z2) = COD).
- Une surface en conversion cristalline, suggérant une transformation progressive entre les deux phases.
- Une section interne homogène présentant un mélange intime de COM et COD.

Pour caractériser chaque forme et estimer les proportions globales, les spectres ont été comparés aux mélanges artificiels de notre bibliothèque de référence (COM:COD = 0:100, 20:80, 40:60, 50:50, 60:40, 80:20, 100:0), en se focalisant sur les régions 800-950 cm^{-1} (bande à 918 cm^{-1}, spécifique à COD) et 2600-3800 cm^{-1} (intensité O-H, croissante avec COD).

❖ **Forme n°1 – Surface à deux zones distinctes (COM et COD séparés) :**

Les spectres FTIR ont été enregistrés séparément sur les deux zones identifiées morphologiquement (zone 1 = COM, zone 2 = COD).

4 échantillons présentent des spectres variables selon la zone analysée (Figure 74). Les zones C2 montrent des bandes intenses à 918 cm^{-1} et des bandes larges à 3400 cm^{-1} (proches de 0:100 avec un score 92-93 %,) tandis que les zones C1 privilégient 1311 et 1612 cm^{-1} (proches de 100:0). Le spectre moyen par échantillon (Figure 75) est proche de 40:60 (scores 90-92 %), en accord avec **Daudon et al. (2018),** qui notent une prédominance de COD en surface dans les calculs mixtes, liée à des conditions urinaires favorisant sa précipitation initiale dans des urines sursaturées en oxalate et calcium, avant une éventuelle transformation en COM.

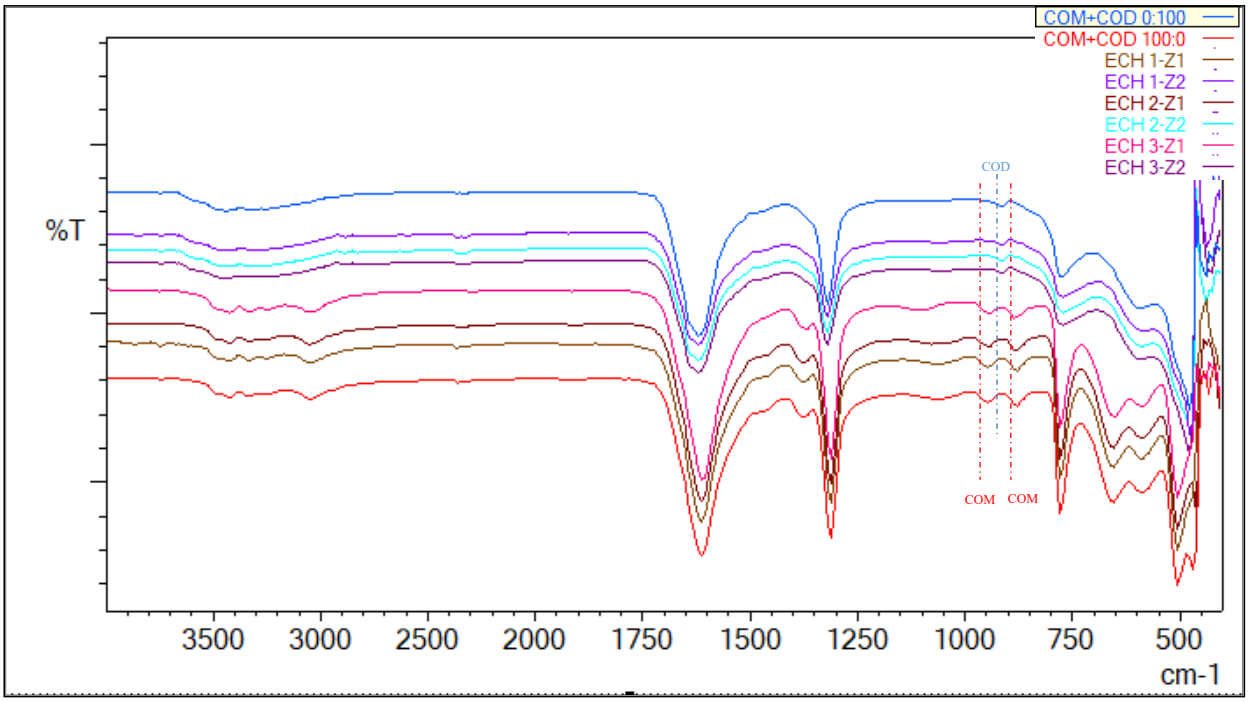


Figure 67 : Superposition des spectres FTIR enregistrés sur les zones COM et COD des surfaces avec les standards respectifs.

Ces résultats confirment la **présence côte à côte des deux phases**, observée morphologiquement

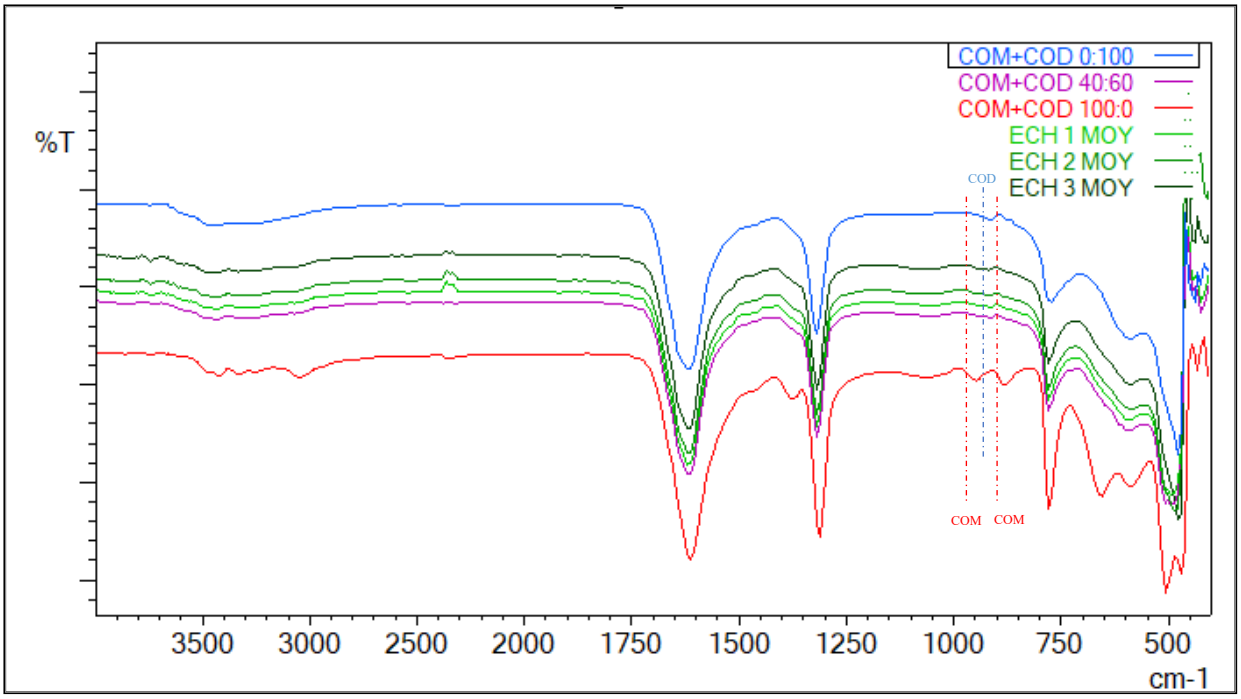


Figure 68 : Superposition des spectres moyens FTIR enregistrés en surfaces avec les standards respectifs.

- **Forme n°2 – Surface en conversion cristalline :**

4 échantillons révèlent une hétérogénéité (Fig 76) : des zones riches en COD (bandes à 918 cm^{-1} et 3400 cm^{-1}) coexistent avec des zones en conversion vers COM (diminution de 918 cm^{-1}, augmentation relative de 948 et 879 cm^{-1}). Les spectres moyens sont proches de 60:40 (scores 89-91 %), indiquant une transition partielle de COD en COM. Cette conversion est corroborée par **Li et al. (2023),** qui décrivent une déshydratation partielle de COD en COM dans des calculs exposés à des cycles d'humidité et température modérée, avec une perte progressive de la bande à 918 cm^{-1}.

Suggérant une déshydratation spontanée de COD en COM, probablement accentuée par des conditions de stockage ou un microenvironnement urinaire acide

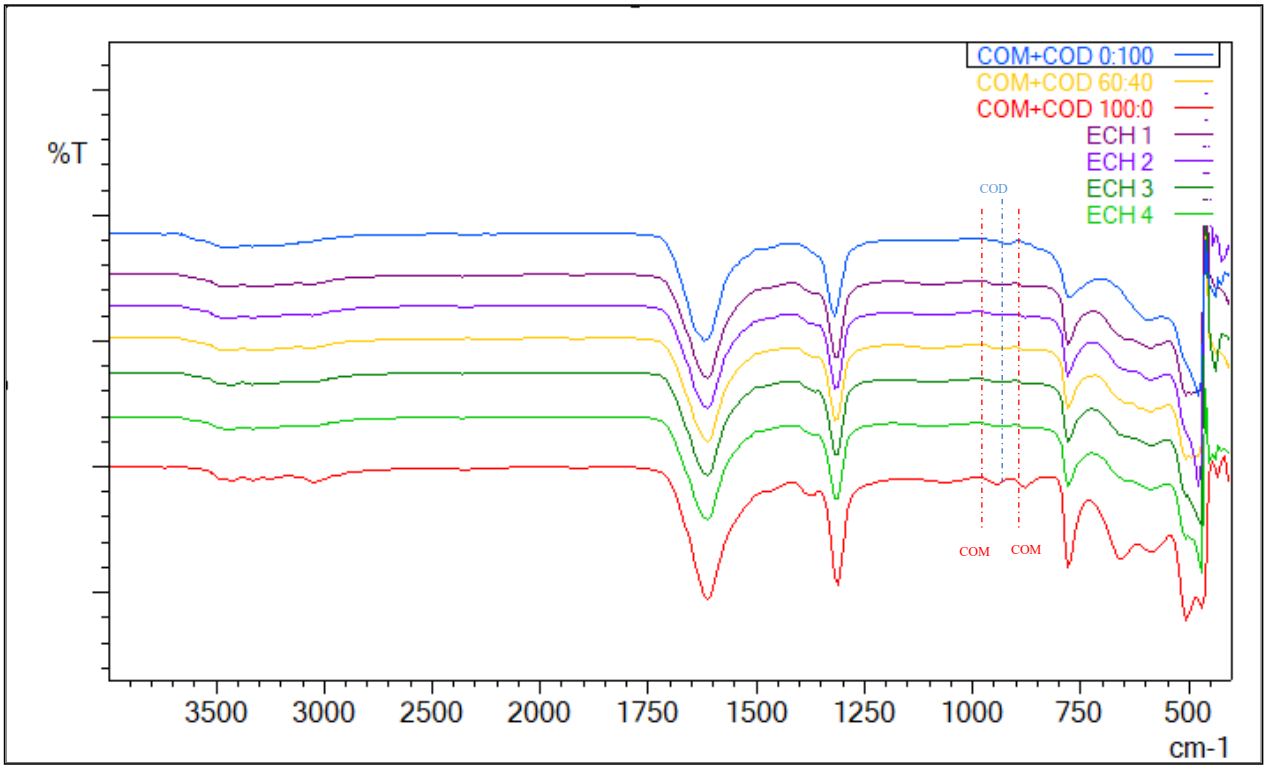


Figure 69 : Superposition du spectre de l'échantillon avec les mélanges artificiels COM+COD 60 :40

L'ensemble des résultats suggère une conversion partielle du COD en COM, comme observé en microscopie. La correspondance avec le mélange COM 60% / COD 40% confirme une transformation cristalline en cours.

- **Forme n°3 – Mélange intime COM + COD en section :**

3 échantillons présentent des spectres homogènes en section, avec des bandes équilibrées de COM et COD. Les proportions estimées sont : 2 échantillons proches de 20:80 (scores 89-91 %) et 1 proche de 80:20 (score 88 %), Ces mélanges homogènes sont cohérents avec **Zhang et al. (2020)** [218]**,** qui rapportent des calculs mixtes internes avec des ratios COM:COD variables, et associent ces structures à des gradients de pH urinaire favorisant une co-précipitation de COM et COD.

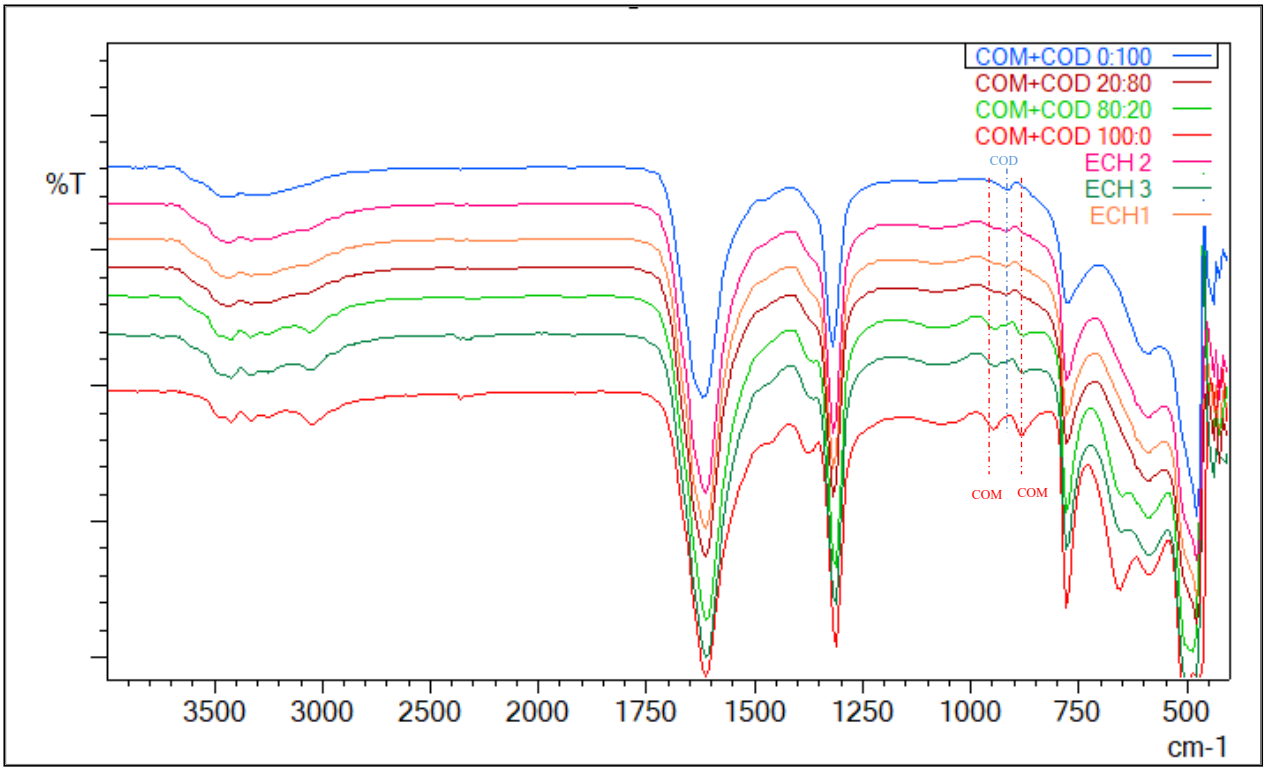


Figure 70 : Superposition du spectre de section avec les mélanges artificiels.

Les résultats confirment un mélange cristallin intime et stable des deux phases dans le noyau du calcul. L'analyse croisée montre que ces échantillons se comportent comme des mélanges homogènes à parts égales ou légèrement dominés par le COM.

4.2 Acide urique et purine

4.2.1.a Échantillons purs d'acide urique anhdre (IIIa)

- **Spectroscopie infrarouge (FTIR)**

Les 12 échantillons classés comme Type IIIa présentent des spectres cohérents avec la composition en acide urique anhydre (AU0).

La superposition d'un spectre représentatif de Type IIIa avec le standard de référence est présentée dans la Figure ci-dissous.

Les spectres montrent une forte similitude avec la référence AU0, avec des bandes caractéristiques bien définies autour de 1685 cm^{-1}, 1303 cm^{-1} ,1026 cm^{-1} et 702 cm^{-1} . Le score de corrélation moyen avec AU0 est de 94,2 % (± 1,5 %)**. Daudon et al. (2018)** associent cette homogénéité à des calculs formés à pH < 5,5, où AU0 domine en raison de sa stabilité thermodynamique **(Khan et al., 2017).** L'absence de bande intense à 3400 cm^{-1} ou 1480 cm^{-1} exclut une présence notable d'AU2 ou UR, en accord avec la morphologie compacte observée.

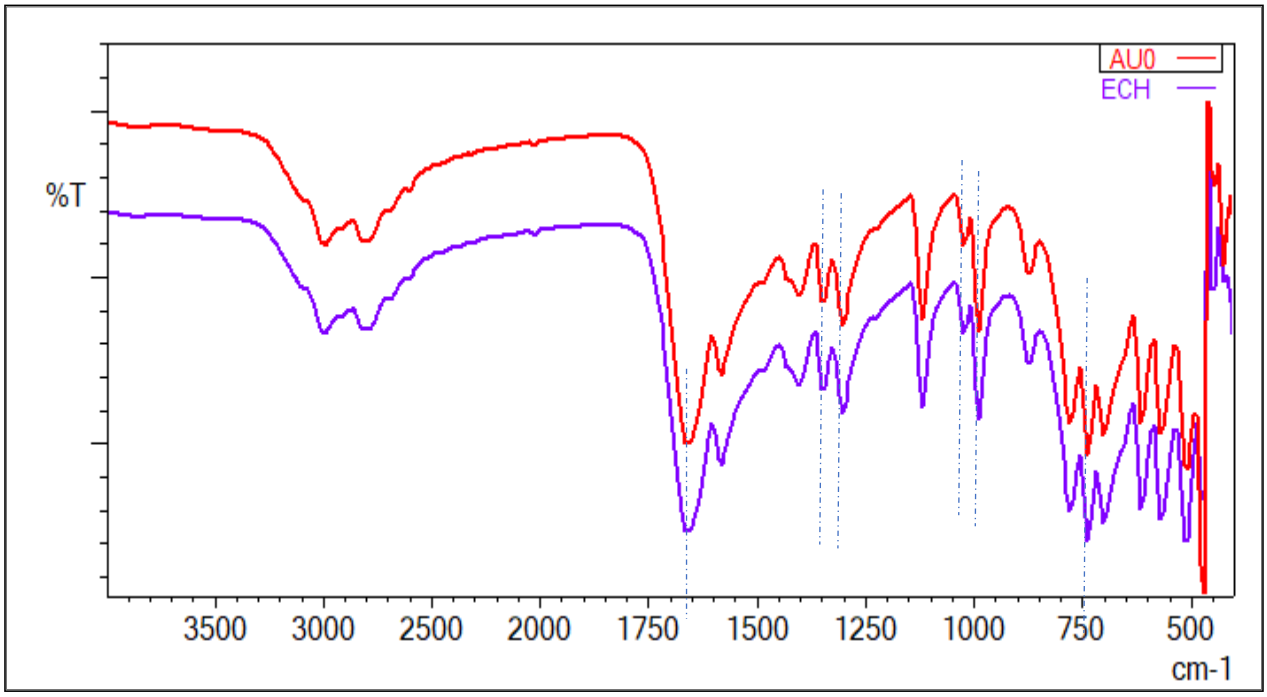


Figure 71 : Superposition des spectres des échantillons AU_0 avec le standard AU_0.

Aucune variation significative des bandes principales n'a été observée parmi les échantillons de Type IIIa, suggérant une homogénéité chimique, en accord avec leur classification morphologique unique.

- **Analyse thermique (TG+DSC)**

La superposition des thermogrammes représentatifs TG-DSC de Type IIIa avec le standard de référence est présentée dans la Figure ci-dessous.

Les thermogrammes révèlent une **seule transition thermique vers 350–500°C**, sans perte de masse préalable.

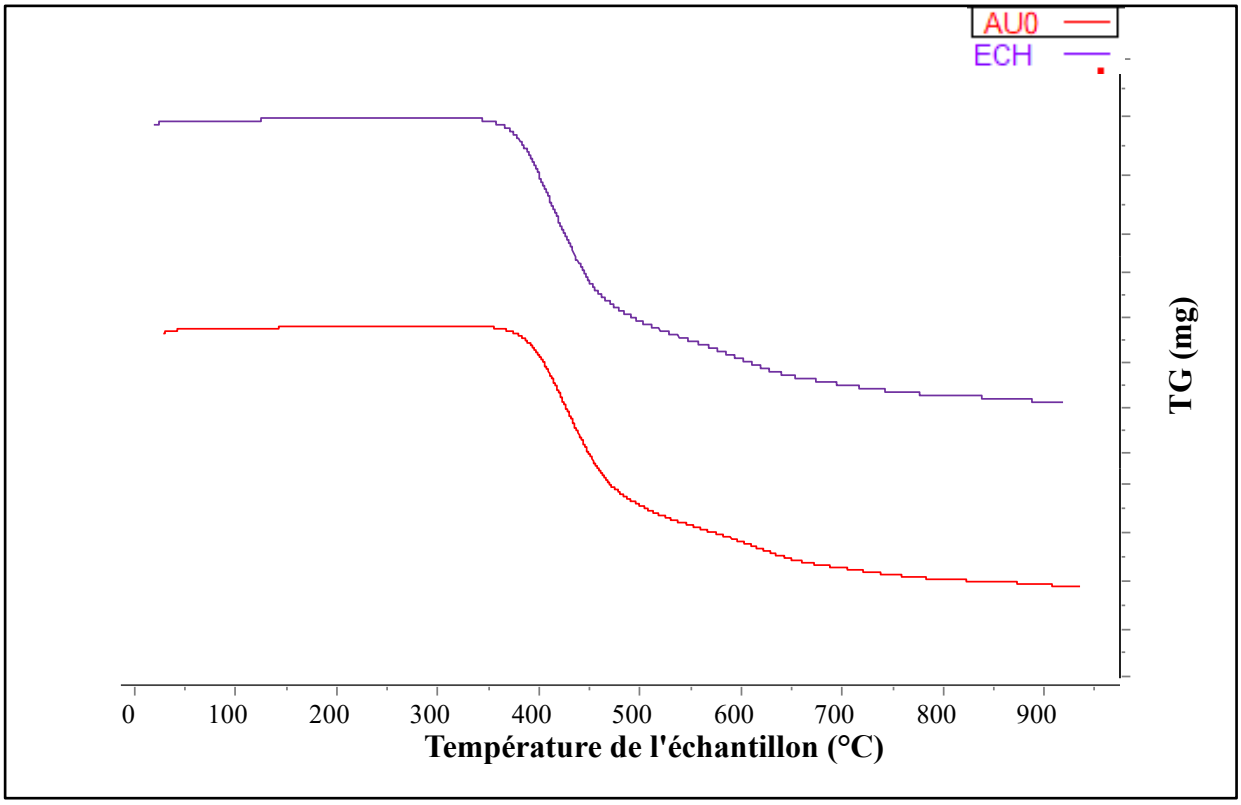


Figure 72 : Superposition des thermogrammes ATG des échantillons AU₀ avec le standard AU₀.

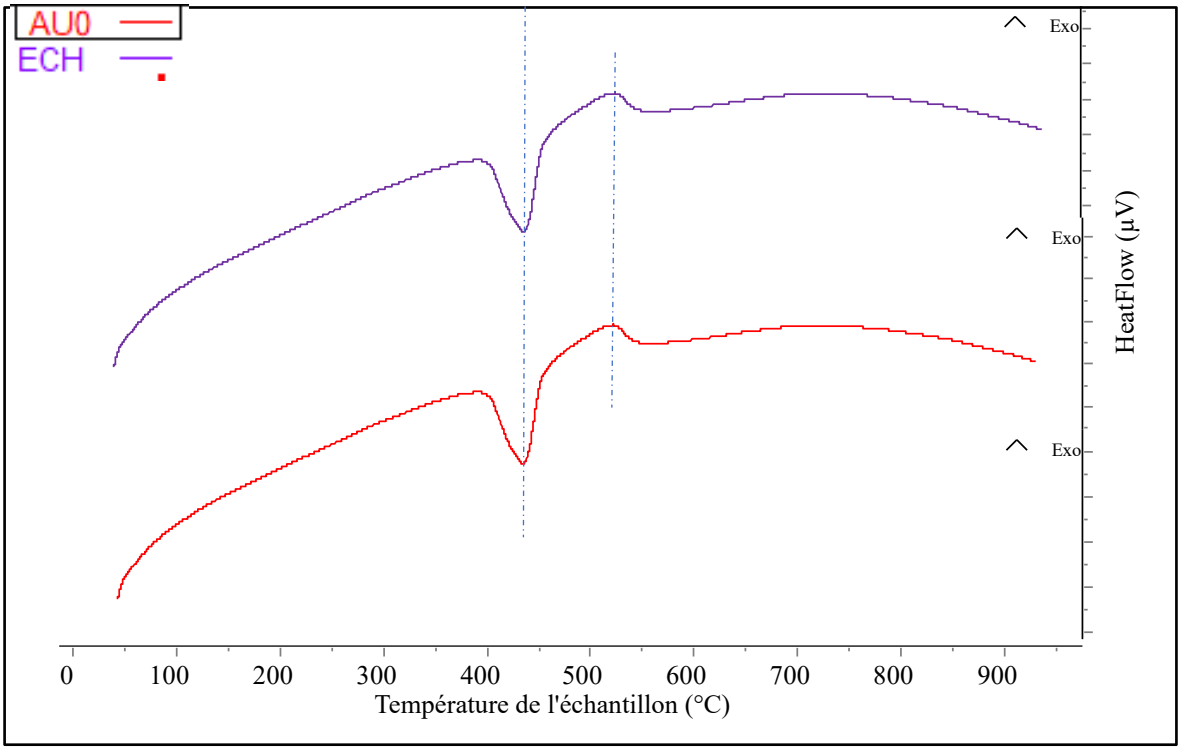


Figure 73 : Superposition des thermogrammes DSC des échantillons AU₀ avec le standard AU₀.

- Les thermogrammes (Figure 89-90) montrent une perte unique de masse moyenne de 60,5 % (± 0,5 %) entre 300 et 450 °C est associée à un pic endothermique DSC à 425-430 °C (± 3 °C) Cette décomposition directe, sans étape préalable, reflète une structure anhydre stable, validée par **Kaloustian et al. (2002)** et **Kaloustian et al. (2003)** pour les calculs matures de type IIIa.

- Les données spectroscopiques et thermiques confirment une **forme pure et stable d'acide urique anhydre (AU_0)**, en accord avec la morphologie observée.

4.2.1.b Échantillons purs d'acide urique dihydraté AU2

- **Spectroscopie infrarouge (FTIR)**

La superposition d'un spectre d'acide urique dihydraté (AU_2) avec le standard de référence est présentée dans la Figure ci-dessous.

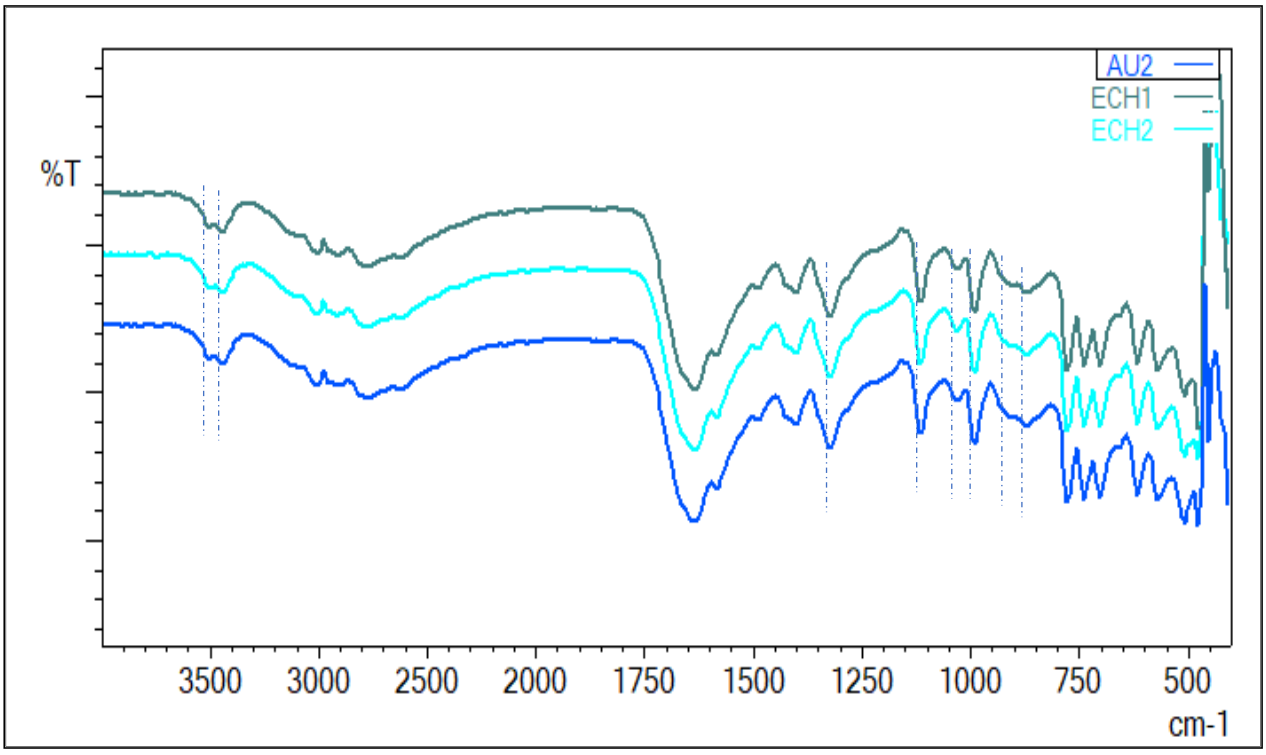


Figure 74 : Superposition des spectres des échantillons AU_2 avec le standard AU_2.

Les spectres des 2 échantillons montrent une correspondance étroite avec le standard AU2 ($C_5H_4N_4O_3 \cdot 2H_2O$), avec un score de corrélation spectrale de 92,5 %, indiquant une composition chimique homogène et une pureté élevée. Les bandes caractéristiques, déjà détaillées pour le standard (Tableau 31), sont toutes présentes sans décalage notable, confirmant la nature

dihydratée des échantillons. En particulier, la bande large et intense à 3446-3502 cm^{-1} (ν(OH) des molécules d'eau zéolithique) et la bande spécifique à 902 cm^{-1} (vibration de l'eau de cristallisation) dominent les spectres, en accord avec les marqueurs d'hydratation décrits précédemment. Aucune bande attribuable à l'acide urique anhydre (AU0, ex. 1658 cm^{-1}, 1350 cm^{-1}) ou à l'urate acide d'ammonium (UR, ex. 1427-1388 cm^{-1}) n'est détectée, excluant une contamination par ces formes.

Cette homogénéité spectroscopique valide la classification morphologique des échantillons comme sous-type IIIb, caractérisé par une texture poreuse liée à l'incorporation d'eau zéolithique (chapitre 2, Figure 52 b). Comparée aux observations de **Wregg et al. (2024) et Abbassene (2017)** [219] [220]**,** qui associent des spectres similaires (ν(OH) à 3400-3500 cm^{-1}-3100-3500 cm^{-1}) à des lithiases formées dans des urines à pH < 5,5 avec faible hydratation, Notre analyse suggère que nos échantillons sont formés dans des conditions physiopathologiques favorisant la cristallisation d'AU2. La présence marquée de la bande à 902 cm^{-1}, également rapportée par **Abbassene (2017)** à 900 cm^{-1} pour les hydrates uriques, renforce l'identification d'AU2 et souligne la fiabilité de la FTIR pour différencier les polymorphes puriques.

Ces résultats confirment la pertinence de la spectroscopie FTIR pour le diagnostic précis des lithiases puriques, en complément de l'analyse morphologique. Ils constituent une base solide pour l'analyse thermique ultérieure de cet échantillon, qui permettra de vérifier la cohérence des propriétés thermiques avec la structure dihydratée.

- **Analyse thermique (TG+DSC+DTG) :**

L'analyse thermique des deux échantillons purs d'acide urique dihydraté (AU2, sous-type IIIb) (10 -9.5 mg) confirme leur composition, en complément des résultats FTIR. Les thermogrammes, superposés au standard AU2, sont présentés dans la Figure 92-93.

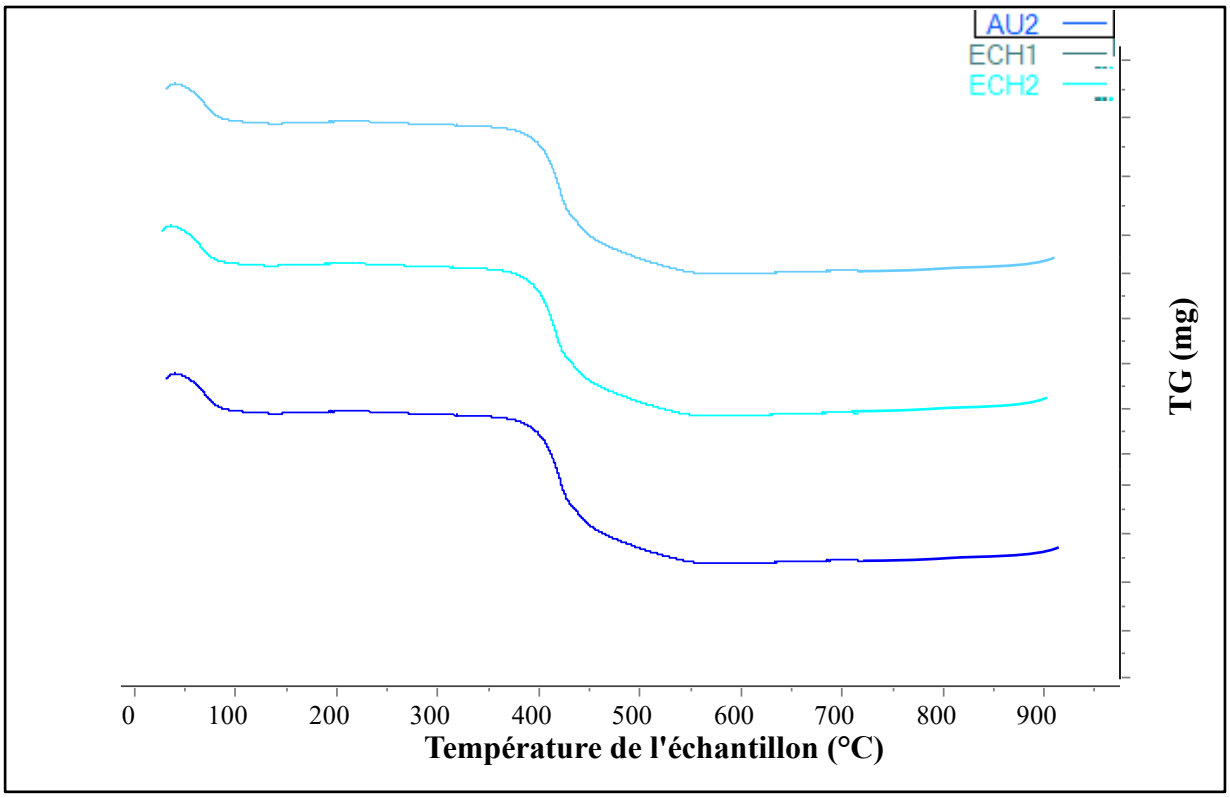


Figure 75 : Superposition des thermogrammes ATG des échantillons AU2 avec le standard AU2.

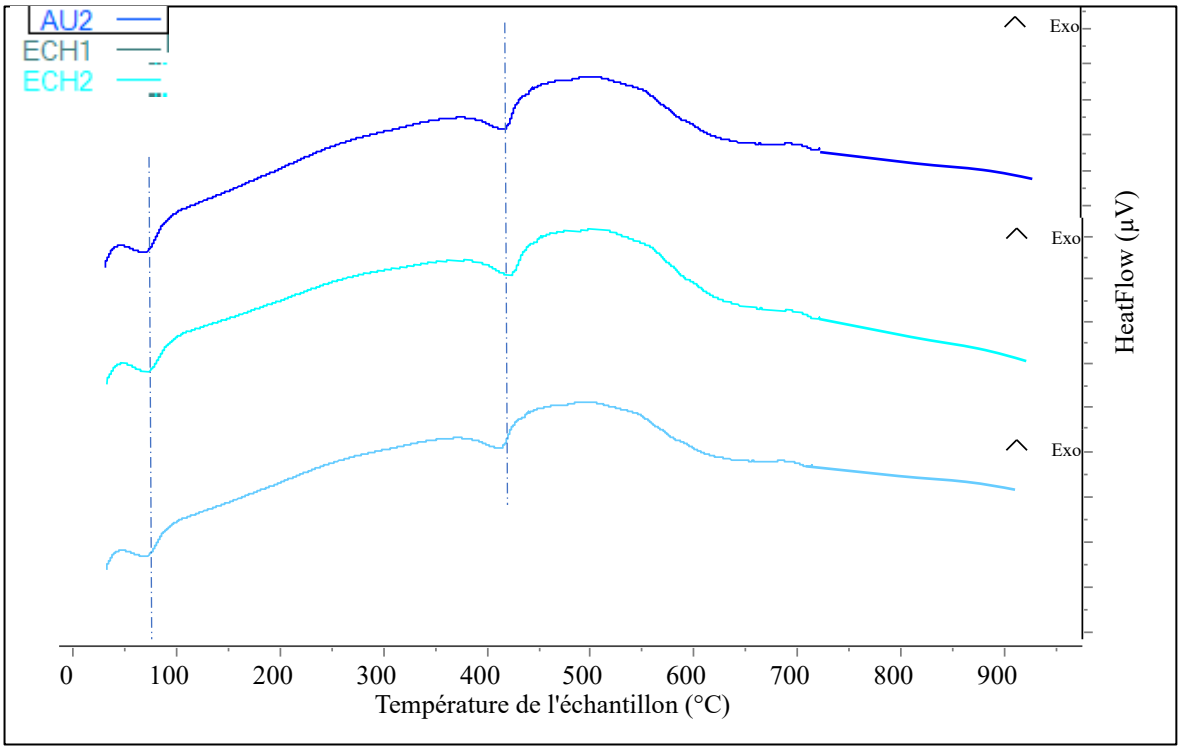


Figure 76 : Superposition des thermogrammes DSC des échantillons AU2 avec le standard AU2.

Chaque échantillon montre une perte de 12,0 % entre 50 °C et 150 °C (pic DSC à 100 °C), correspondant à la déshydratation des deux molécules d'eau zéolithique, comme attendue pour AU2. Cette étape, absente dans AU0, valide la structure hydratée et la porosité décrite au chapitre 2 (Figure 52-b), en accord avec **Abbassene (2017).**

Entre 300 °C et 450 °C, une perte de 48,0 % (pic DSC à 415 °C) indique la décomposition de l'anneau purique, suivie d'une perte de 10,0 % à 450-500 °C (pic DSC à 458 °C) due à l'oxydation du résidu carboné. Ces transitions, identiques au standard AU2, confirment la pureté des échantillons, sans trace d'AU0 ou UR. La décomposition à 415 °C, plus basse qu'AU0 (429 °C), suggère une stabilité thermique moindre, pouvant favoriser une transition vers AU0, comme noté par **Ghenaiet 2023.** Lient ce profil à des conditions favorisant AU2.

Ces résultats renforcent les observations FTIR, et valident l'identification d'AU2.

La cohérence entre les profils thermiques et spectroscopiques valide l'utilisation combinée de ces techniques pour le diagnostic précis des lithiases puriques.

4.2.1.a Mélange AU0+AU2

- **Spectroscopie infrarouge (FTIR)**

Les 7 échantillons classés comme mélanges AU0+AU2 (6,7 % de l'ensemble) ont été analysés par FTIR pour confirmer leur composition et leur organisation. Selon l'analyse morphologique (chapitre 2, Figures 53), ces mélanges se présentent sous trois formes distinctes :

- Mélanger la surface avec AU0+AU2 intimement (3 échantillons).
- Section interne homogène avec AU0+AU2 intime (2 échantillons).
- Section avec deux couches distinctes (couche 1 = AU0, couche 2 = AU2) (2 échantillons).

Les spectres ont été comparés aux mélanges artificiels de référence, en se focalisant sur les bandes spécifiques d'AU2 (3446-3502 cm^{-1}, ν(OH)) ; 902 cm^{-1}, eau zéolithique) et d'AU0 (1350 cm^{-1}, ν(CN) ; 1303 cm^{-1}, ν(CN) ; 1026 cm^{-1}, ν(CO)).

Forme n°1 – Mélange de surface intime (AU0+AU2) : Les 3 échantillons présentent des spectres homogènes combinant les bandes d'AU0 (1350 cm^{-1}, 1303 cm^{-1}, 1026 cm^{-1}) et d'AU2 (3446-3502 cm^{-1}, 902 cm^{-1}). Les proportions estimées varient : 1 proche de 70:30, 1 de 50:50, et 1 de 30:70 (scores 90-92 %).

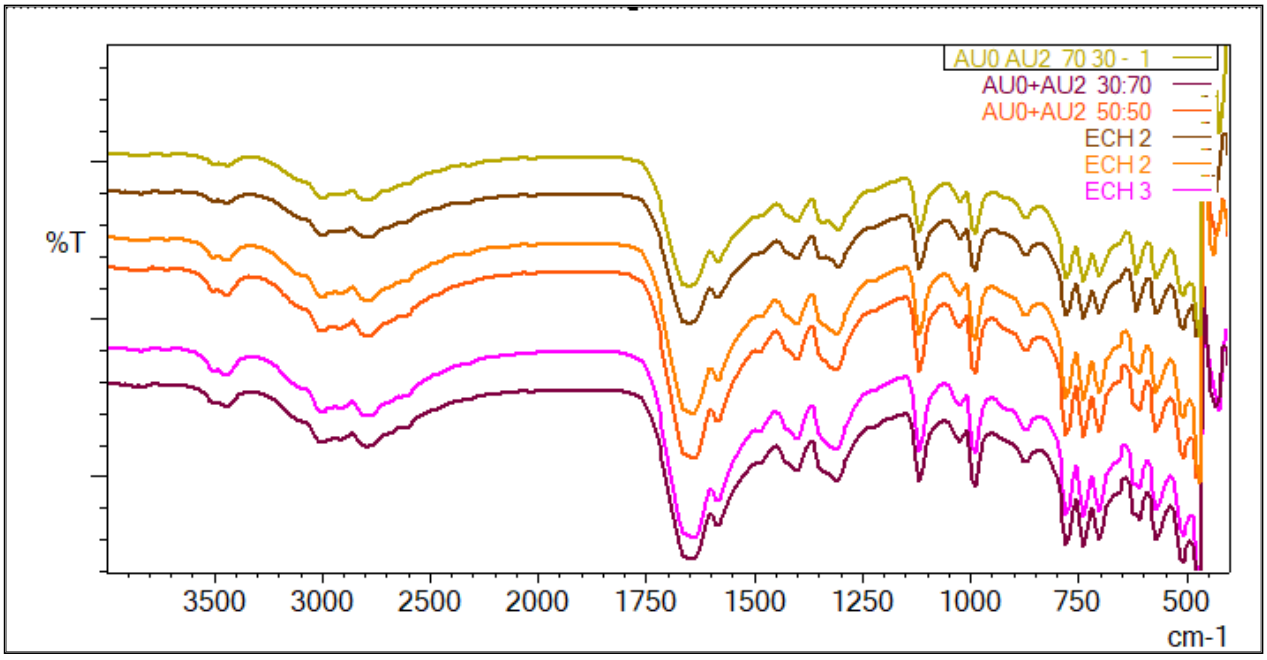


Figure 77 : Superposition des spectres des échantillons mixtes de la forme 1 avec les mélanges artificiels AU_0 + AU_2.

Ce mélange intime en surface, indique une co-précipitation dans des urines à pH acide fluctuant. La bande à 902 cm^{-1}, spécifique à AU2, reflète sa contribution notable, cohérente avec la morphologie mixte respectée (chapitre 1, Figure 45).

Forme n°2 – Section interne homogène (AU0+AU2 intime) : Les 2 échantillons montrent des spectres uniformes avec les bandes d'AU0 (1350 cm^{-1}, 1303 cm^{-1}, 1026 cm^{-1}) et d'AU2 (3446-3502 cm^{-1}, 902 cm^{-1}). Les proportions sont estimées à 50:50 pour l'un et 30:70 pour l'autre (scores 89-91 %). Cette homogénéité interne suggère une co-cristallisation sous des gradients de pH urinaire. La bande à 902 cm^{-1} confirme une forte présence d'AU2, en lien avec la morphologie dense mais poreuse (chapitre 2, Figure 53).

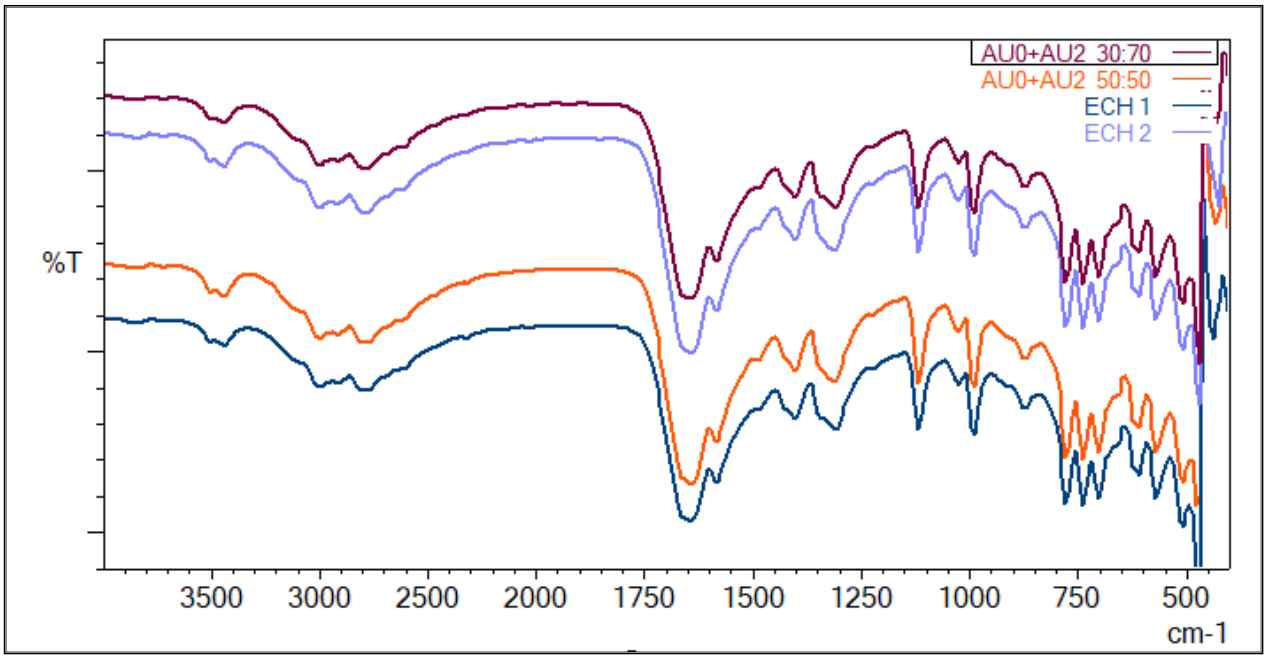


Figure 78 : Superposition des spectres des échantillons mixtes de la forme 2 avec les mélanges artificiels AU_0 + AU_2.

Forme n°3 – Section avec deux couches distinctes (couche 1 = AU0, couche 2 = AU2)

Les 2 échantillons ont été analysés par couche. La couche 1 présente des spectres typiques d'AU0 (1350 cm^{-1}, 1303 cm^{-1}, 1026 cm^{-1}, score 95 % avec 100:0), sans trace de 3446-3502 cm^{-1} ou 902 cm^{-1}. La couche 2 correspond à AU2 (3446-3502 cm^{-1}, 902 cm^{-1}, score 94 % avec 0:100), sans 1350 cm^{-1}, 1303 cm^{-1} ou 1026 cm^{-1}. Cette séparation, indique une précipitation séquentielle : AU0 dans un milieu très acide, suivi d'AU2. Ces couches valident les structures stratifiées liées (chapitre 2, Figure 53).

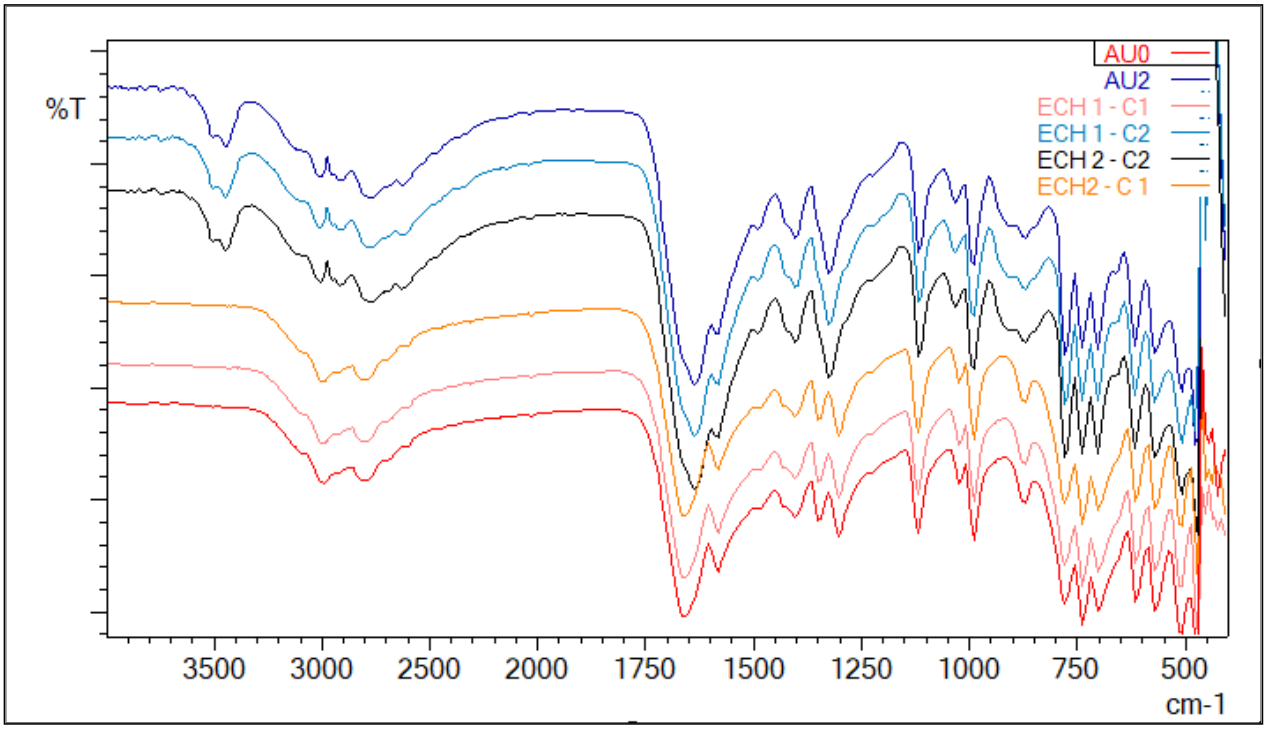


Figure 79 : Superposition des spectres des échantillons mixtes de la forme 3 avec les standards AU_0 - AU_2.

Ces résultats FTIR confirment la diversité des mélanges AU0+AU2, des formes intimes aux structures stratifiées, en lien avec leurs morphologies et conditions de formation.

- **Analyse thermique (TG+DSC+DTG)**

Les 7 échantillons classés comme mélanges AU0+AU2 (6,7 % de l'ensemble) ont été analysés par TG/DSC/DTG pour caractériser leur comportement thermique et compléter l'analyse FTIR. Selon l'analyse morphologique (chapitre 2, Figure 53), ces mélanges se présentent sous trois formes distinctes :

- Mélanger la surface avec AU0+AU2 intimement (3 échantillons).
- Section interne homogène avec AU0+AU2 intime (2 échantillons).
- Section avec deux couches distinctes (couche 1 = AU0, zone 2 = AU2) (2 échantillons).

Les thermogrammes ont été comparés aux mélanges artificiels de référence, en se focalisant sur la déshydratation d'AU2 (50-150 °C) et la décomposition d'AU0 et AU2 (300-500 °C).

- **Forme n°1 – Mélange de surface intime (AU0+AU2)**

Les 3 échantillons (10 mg chacun) montrent une déshydratation à 50-150 °C (pertes de 4,8 %, 6,0 %, 7,2 %, pic DSC à 100 °C), proportionnellement à la teneur en AU2, suivie d'une décomposition à 400-450 °C (pertes 50-55 %, pic DSC à 415-420 °C) et d'une oxydation résiduelle à 450-500 °C (pertes ~10 %, pic DSC à 458 °C). Ces profils, proches des mélanges artificiels 80:20, 50:50, et 20:80, confirment un mélange intime. La décomposition à 415-420 °C, plus basse qu'AU0 pur (429 °C), reflète l'influence d'AU2, dont la stabilité thermique moindre peut favoriser une transition vers AU0, cohérentes avec la morphologie mixte (chapitre 2, Figure 53).

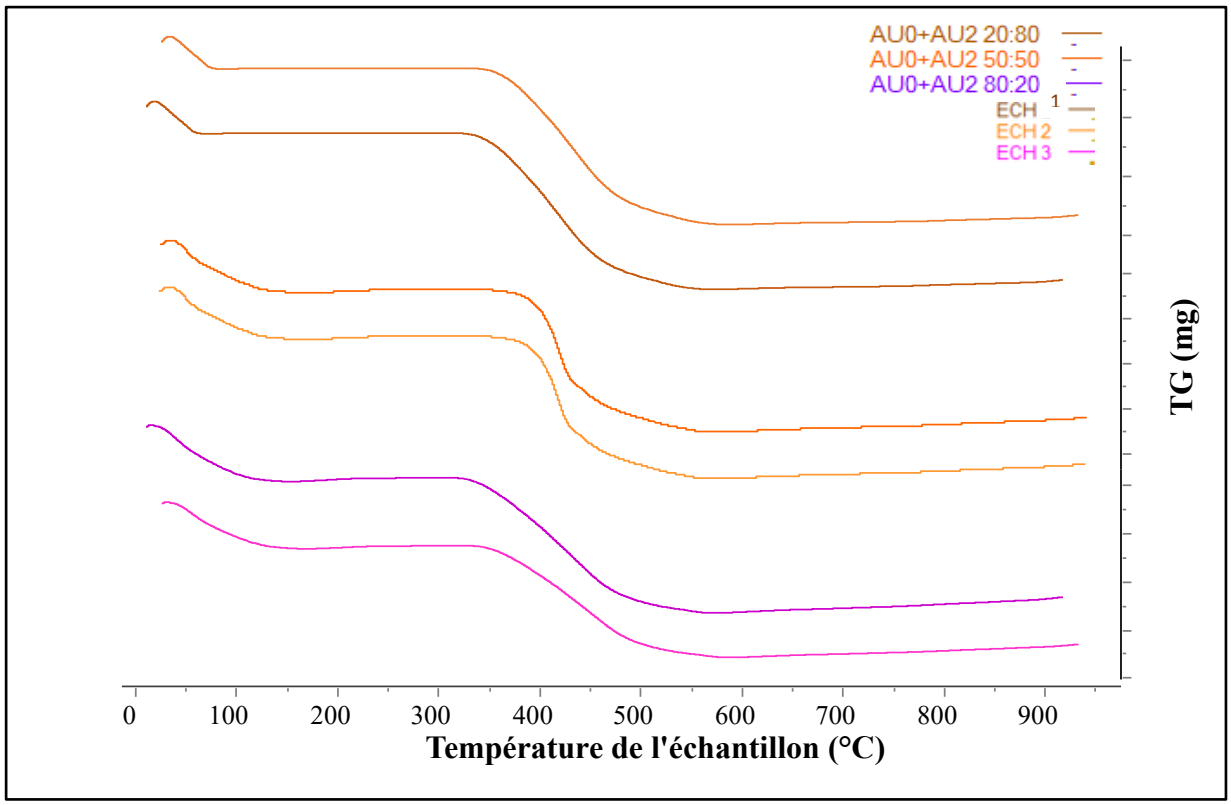


Figure 80 : Superposition des thermogrammes ATG des échantillons mixtes de la forme 1 avec les mélanges artificiels AU0+AU2

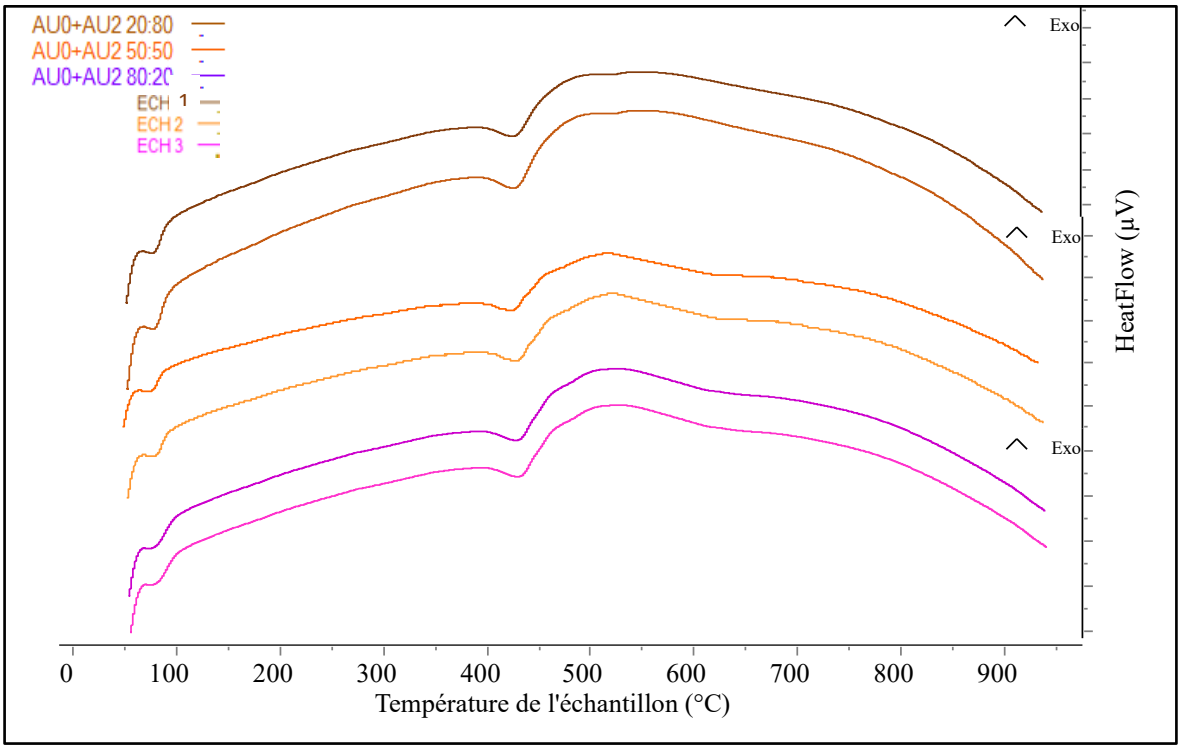


Figure 81 : Superposition des thermogrammes DSC des échantillons mixtes de la forme 1 avec les mélanges artificiels AU0+AU2

Forme n°2 – Section interne homogène (AU0+AU2 intime)

Les 2 échantillons (10 mg chacun) présentent une déshydratation à 50-150 °C (pertes de 6,0 % et 7,2 %, pic DSC à 100 °C), une décomposition à 400-450 °C (pertes ~55 %, pic DSC à 415-420 °C), et une oxydation à 450-500 °C (pertes ~10 %, pic DSC à 458 °C). Ces profils correspondant aux mélanges artificiels 50:50 et 20:80, validant une homogénéité interne. La décomposition précoce (415-420 °C) indique une stabilité réduite limitée à AU2, en accord avec **Abbassene (2017)** et **Wregg et al. (2024)** s'appuient sur ces mélanges à une co-cristallisation sous gradients de pH, parallèlement à la morphologie dense mais poreuse (chapitre 2, Figure 53).

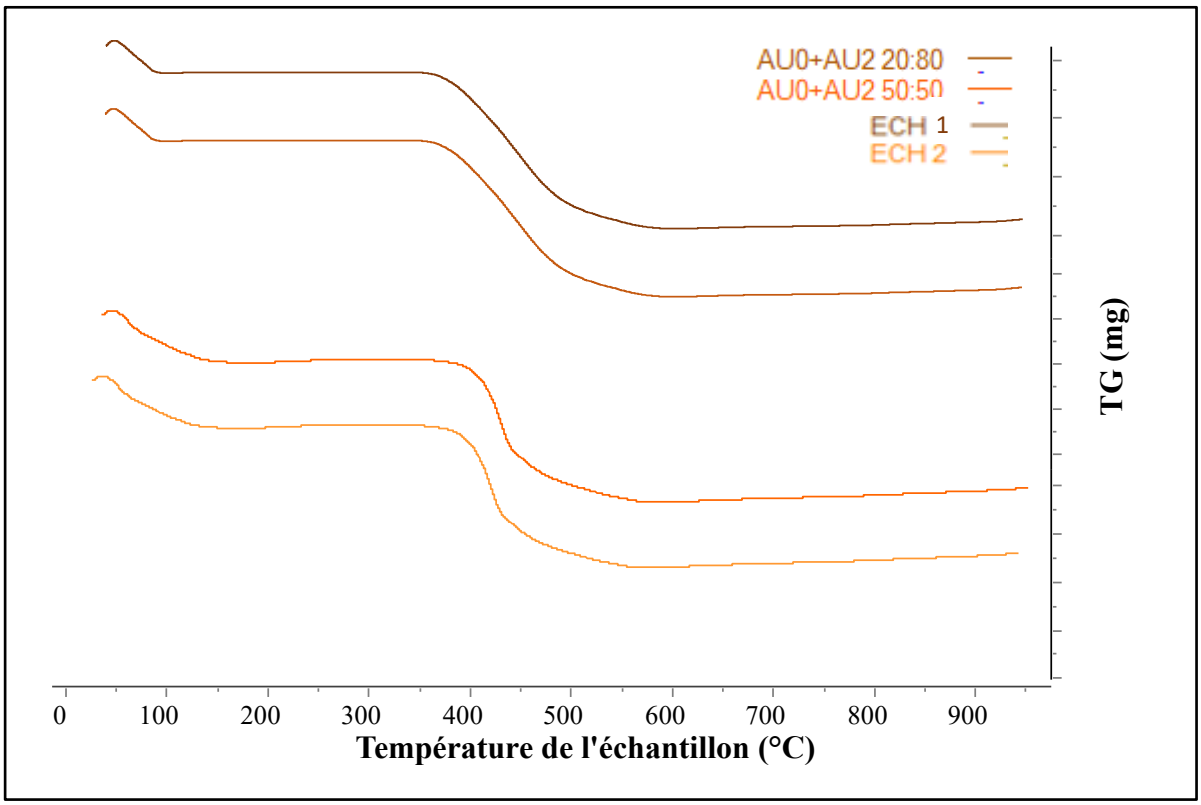


Figure 82 : Superposition des thermogrammes ATG des échantillons mixtes de la forme 2 avec les mélanges artificiels AU0+AU2

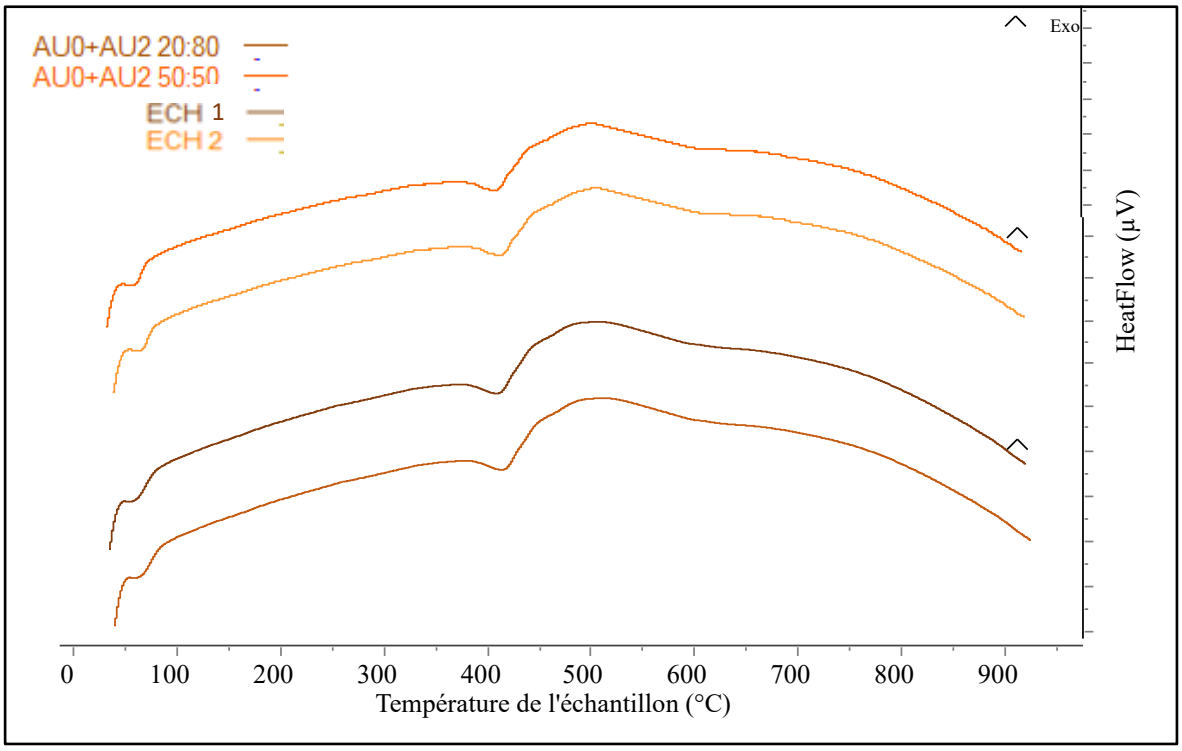


Figure 83 : Superposition des thermogrammes DSC des échantillons mixtes de la forme 2 avec les mélanges artificiels AU0+AU2

Forme n°3 – Section avec deux couches distinctes (couche 1 = AU0, zone 2 = AU2)

Les 2 échantillons (10 mg chacun) ont été analysés globalement, mais leurs profils différencient les couches distinctes. La couche 1 (AU0) ne montre pas de déshydratation et se décompose à 429 °C (perte ~60 %, pic DSC), comme AU0 pur (100:0). La zone 2 (AU2) présente une déshydratation à 50-150 °C (12,0 %, pic DSC à 100 °C), une décomposition à 415 °C (48,0 %), et une oxydation à 458 °C (10,0 %), comme AU2 pur (0:100). Cette séparation thermique suggère une formation séquentielle : AU0 dans un milieu très acide, suivi d'AU2. Ces profils valident les structures stratifiées liées (chapitre 2, Figure 53)

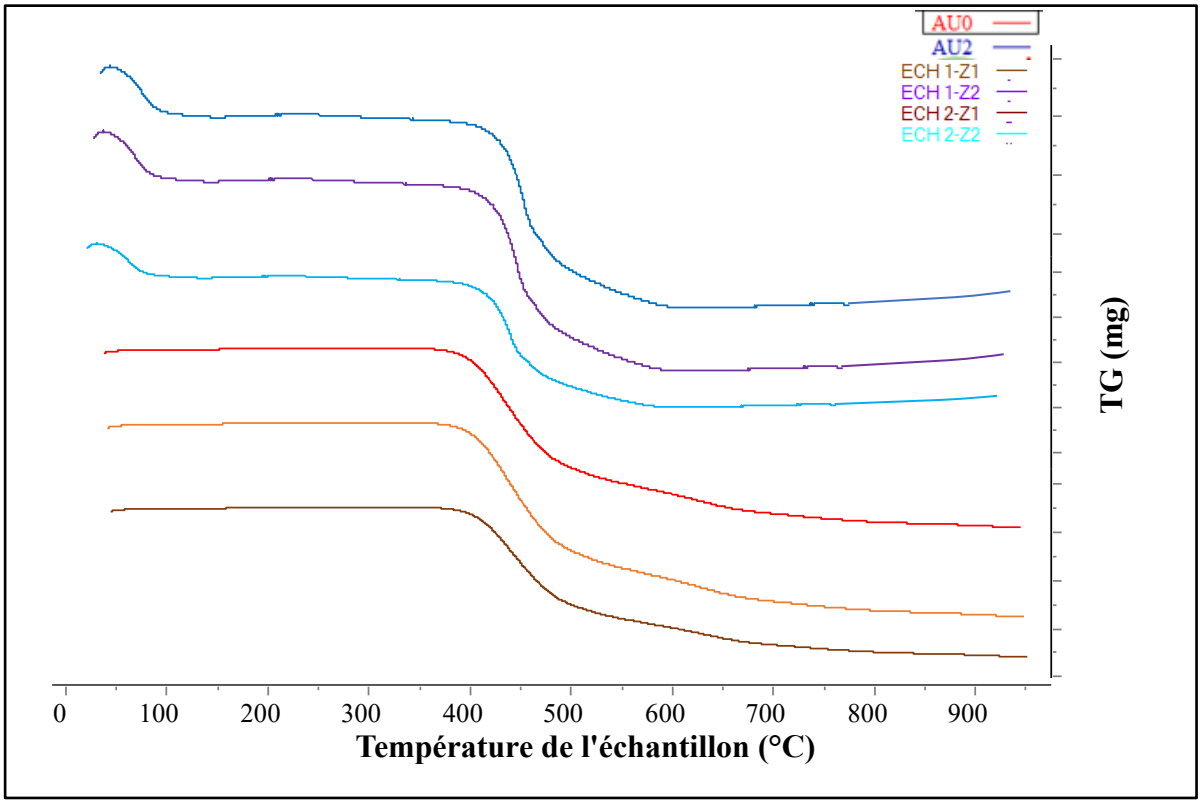


Figure 84 : Superposition des thermogrammes ATG des échantillons mixtes de la forme 3 avec les mélanges artificiels AU0+AU2

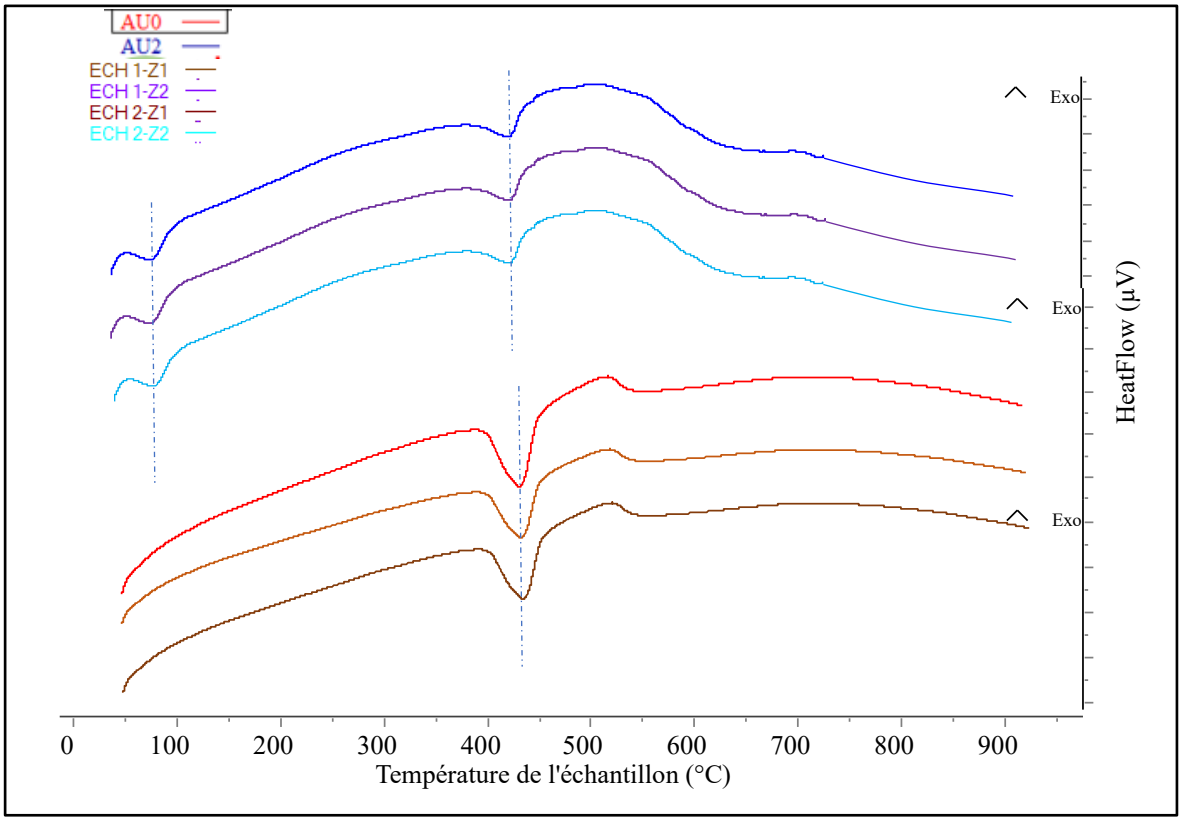


Figure 85 : Superposition des thermogrammes DSC des échantillons mixtes de la forme 3 avec les mélanges artificiels AU0+AU2

Ces résultats thermiques confirment la composition et l'organisation des mélanges AU0+AU2, Cela suggère soit une **cristallisation simultanée**, soit une **conversion partielle** en cours.

4.2.2 Analyse des mélanges inter-familles

4.2.2.a Analyse des échantillons réels de mélanges inter-familles

- **Mélanges de COM+AU0**

Spectroscopie infrarouge (FTIR)

Les deux échantillons réels identifiés comme mélanges COM+AU0 ont été analysés par FTIR pour confirmer leur composition et leur organisation. Selon l'analyse morphologique (chapitre 2, figures 54), ces échantillons se présentent sous deux formes distinctes :

- **Forme n°1** : Mélange intime en surface (COM+AU0) dans une zone d'un calcul mixte tertiaire.
- **Forme n°2** : Section avec deux couches distinctes (couche 1 = COM, couche 2 = AU0).

Les spectres ont été comparés aux mélanges artificiels de référence COM+AU0 (0:100, 10:90, 30:70, 50:50, 70:30, 80:20, 90:10, 100:0), en se focalisant sur les bandes caractéristiques de COM (1612 cm^{-1}, ν(C=O) ; 1311 cm^{-1}, ν(CO) ; 780 cm^{-1}, déformation oxalate) et d'AU0 (1658 cm^{-1}, ν(C=O) ; 1581 cm^{-1}, ν(CN) ; 1350 cm^{-1}, ν(CN) ; 1303 cm^{-1}, ν(CN) ; 1026 cm^{-1}, ν(CO) ; 740 cm^{-1}, déformation spécifique).

- **Forme n°1 – Mélange intime en surface (COM+AU0)**

L'échantillon présente un spectre homogène combinant les bandes de COM (1612 cm^{-1}, 1311 cm^{-1}, 780 cm^{-1}) et d'AU0 (1658 cm^{-1}, 1581 cm^{-1}, 1350 cm^{-1}, 1303 cm^{-1}, 1026 cm^{-1}, 740 cm^{-1}). Les proportions estimées sont proches de 50 :50 (score de concordance 92 %). Les intensités des bandes à 780 cm^{-1} (COM) et 740 cm^{-1} (AU0) sont similaires, confirmant un équilibre entre les deux phases. Un léger élargissement à 1600-1610 cm^{-1} est observée, due au chevauchement des vibrations ν(C=O) de COM (1612 cm^{-1}) et d'AU0 (1581 cm^{-1}).

Ce mélange intime en surface suggère une co-précipitation dans des urines à pH acide fluctuant, en cohérence avec la morphologie mixte observée (chapitre 2, Figure 54).

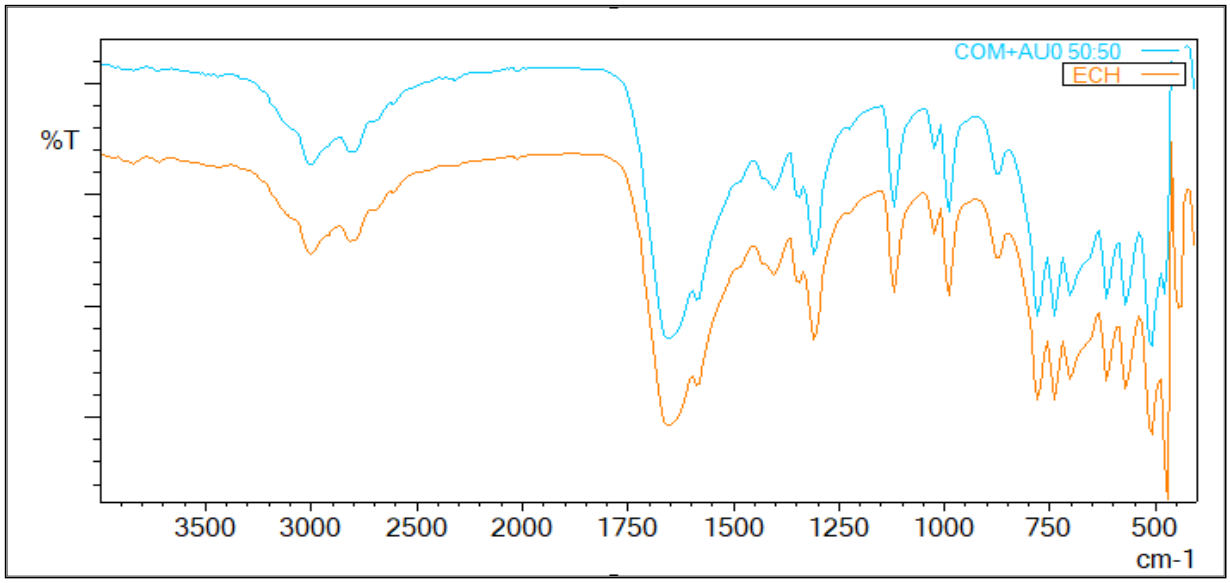


Figure 86 : Superposition des spectres des échantillons mixtes inter-famille de la forme 1 avec le mélange artificiel COM + AU0 50 :50.

Forme n°2 – Section avec deux couches distinctes (couche 1 = COM, couche 2 = AU0)

L'échantillon a été analysé par couche. La couche 1 présente un spectre typique de COM (1612 cm^{-1}, 1311 cm^{-1}, 780 cm^{-1}, score 95 % avec 100:0), sans trace des bandes d'AU0 (1658 cm^{-1},

1581 cm^{-1}, 1350 cm^{-1}, 1303 cm^{-1}, 1026 cm^{-1}, 740 cm^{-1}). La couche 2 correspond à AU0 (1658 cm^{-1}, 1581 cm^{-1}, 1350 cm^{-1}, 1303 cm^{-1}, 1026 cm^{-1}, 740 cm^{-1}, score 94 % avec 0:100), sans trace des bandes de COM (1612 cm^{-1}, 1311 cm^{-1}, 780 cm^{-1}). Cette séparation nette indique une précipitation séquentielle : COM dans un milieu à pH modérément acide, suivi d'AU0 dans un milieu plus acide. Ces couches valident les structures stratifiées liées (chapitre 2, Figure 54).

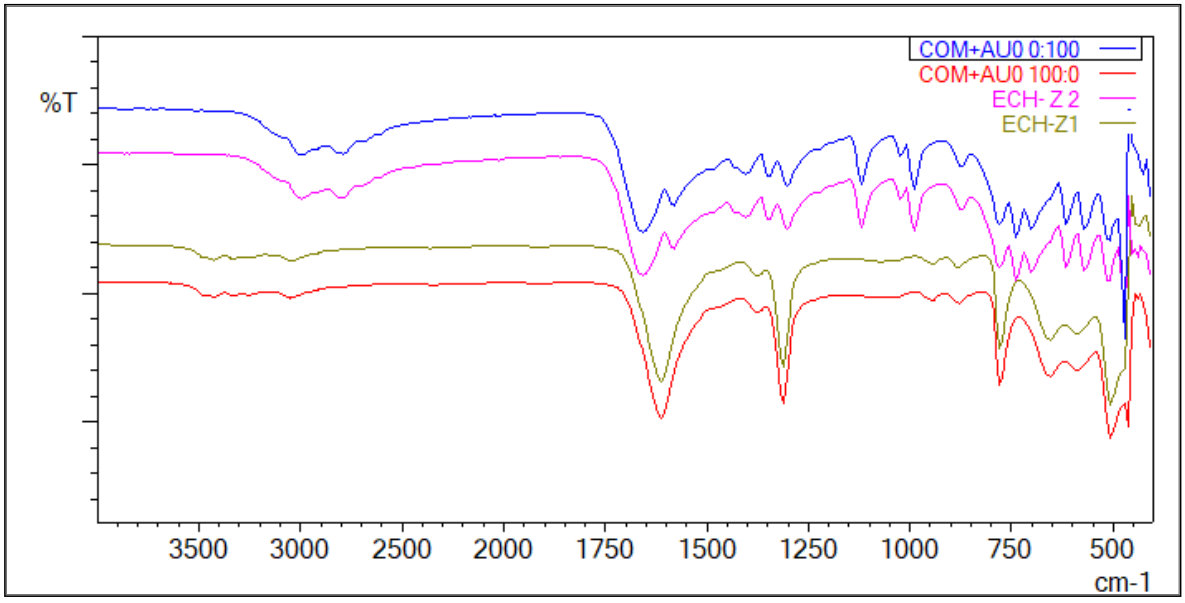


Figure 87 : Superposition des spectres des échantillons mixtes inter-famille de la forme 2 avec les standards COM et AU0

- **Mélange COM+AU2**

Spectroscopie infrarouge (FTIR)

Les deux échantillons réels identifiés comme mélanges COM+AU2 ont été analysés par FTIR pour confirmer leur composition et leur organisation. Selon l'analyse morphologique (chapitre 2, figures 54), ces échantillons se présentent sous une forme unique : sections avec deux couches distinctes (couche 1 = COM, couche 2 = AU2).

Les spectres ont été comparés aux mélanges artificiels de référence COM+AU2 (0:100, 10:90, 20:80, 40:60, 50:50, 60:40, 80:20, 90:10, 100:0), en se focalisant sur les bandes caractéristiques de COM (1612 cm^{-1}, ν(C=O) ; 1311 cm^{-1}, ν(CO) ; 780 cm^{-1}, déformation oxalate) et d'AU2 (3446–3502 cm^{-1}, ν(OH) ; 902 cm^{-1}, eau zéolithique).

Les deux échantillons ont été analysés par couche. La couche 1 présente un spectre typique de COM (1612 cm^{-1}, 1311 cm^{-1}, 780 cm^{-1}, score 95 % avec 100:0), sans trace des bandes d'AU2 (3446–3502 cm^{-1}, 902 cm^{-1}). La couche 2 correspond à AU2 (3446–3502 cm^{-1}, 902 cm^{-1}, score 94 % avec 0:100), sans trace des bandes de COM (1612 cm^{-1}, 1311 cm^{-1}, 780 cm^{-1}). Cette séparation nette indique une précipitation séquentielle : COM dans un milieu à pH modérément acide favorisant la formation d'oxalate de calcium, suivi d'AU2 dans un milieu acide avec hydratation favorisant l'acide urique dihydraté. Ces couches valident les structures stratifiées liées (chapitre 2, Figure 54).

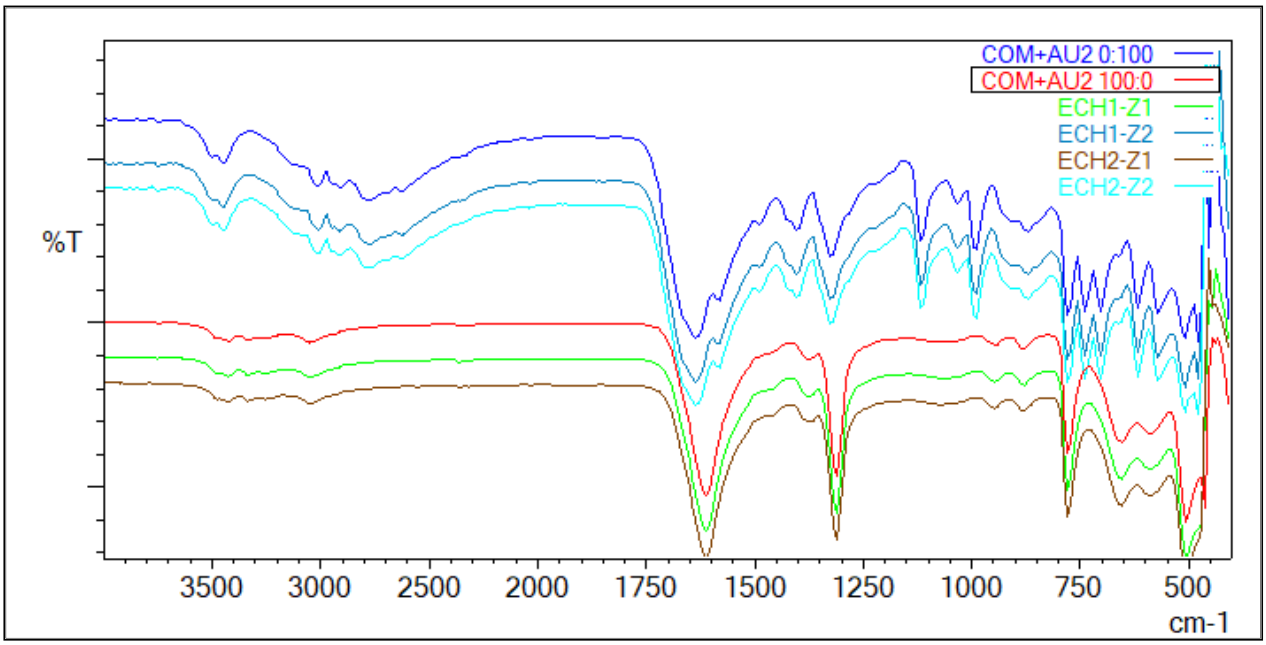


Figure 88 : Superposition des spectres des échantillons mixtes inter-famille avec les standard COM et AU2

- **Mélange COM+UR :**

Spectroscopie infrarouge (FTIR)

Les deux échantillons réels identifiés comme mélanges COM+UR ont été analysés par FTIR pour confirmer leur composition et leur organisation. Selon l'analyse morphologique (chapitre 2, figures 46), ces échantillons se présentent sous deux formes distinctes :

- Forme n°1 : Mélange intime en section (COM+UR).
- Forme n°2 : Section avec deux couches distinctes (couche 1 = COM, couche 2 = UR).

Les spectres ont été comparés aux mélanges artificiels de référence COM+UR (0:100, 10:90, 20:80, 40:60, 50:50, 60:40, 80:20, 90:10, 100:0), en se focalisant sur les bandes caractéristiques de COM (1612 cm^{-1}, ν(C=O) ; 1311 cm^{-1}, ν(CO) ; 780 cm^{-1}, déformation oxalate) et d'UR (bandes spécifiques à l'urate acide d'ammonium, incluant typiquement des vibrations NH_4^+ et urate).

Forme n°1 – Mélange intime en section (COM+UR)

L'échantillon présente un spectre homogène combinant les bandes de COM (1612 cm^{-1}, 1311 cm^{-1}, 780 cm^{-1}) et d'UR (bandes NH_4^+ et urate). Les proportions estimées sont proches de 90:10 (COM:UR, score de concordance 90–92 % avec le mélange artificiel 90:10). Les bandes de COM (notamment 780 cm^{-1} et 1311 cm^{-1}) dominantes, avec une intensité nettement supérieure à celles d'UR, qui restent détectables mais faibles. Un léger élargissement à 1600–1610 cm^{-1} est observée, due au chevauchement des vibrations ν(C=O) de COM et d'UR. Ce mélange intime en surface, riche en COM, suggère une co-précipitation dans des urines à pH modérément acide avec une faible présence d'ammonium, cohérente avec la morphologie mixte observée (chapitre 2, Figure 54).

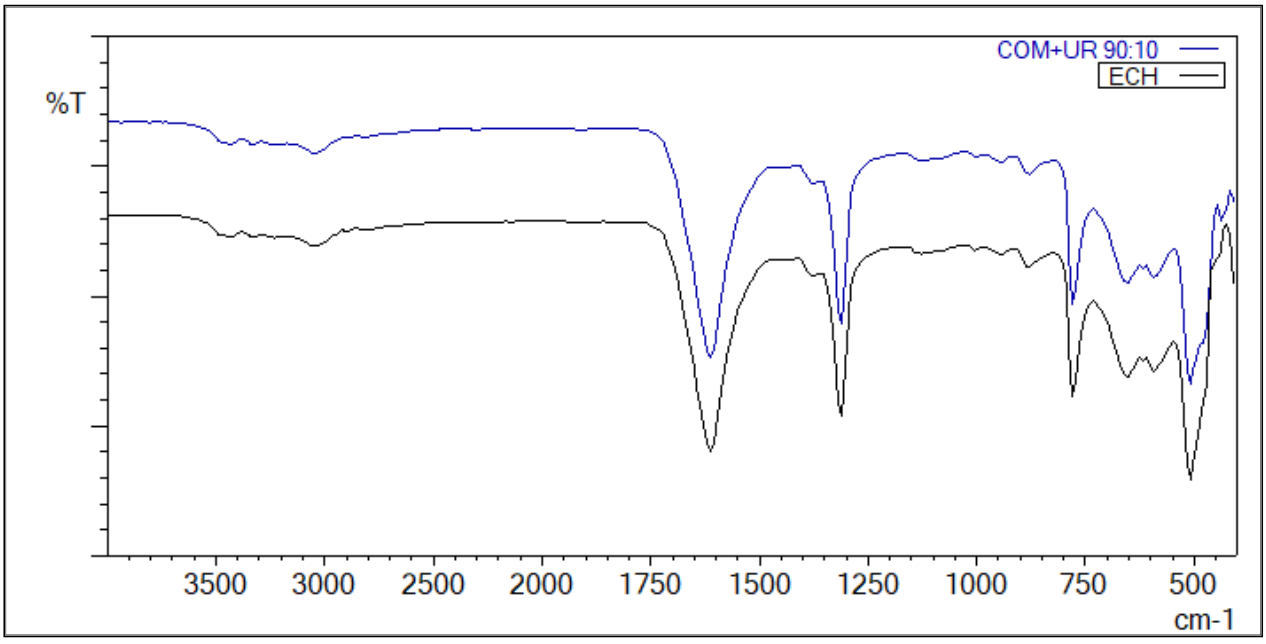


Figure 89 : Superposition des spectres des échantillons mixtes inter-famille avec le mélange COM+UR 90 :10

Forme n°2 – Section avec deux couches distinctes (couche 1 = COM, couche 2 = UR)

L'échantillon a été analysé par couche. La couche 1 présente un spectre typique de COM (1612 cm^{-1}, 1311 cm^{-1}, 780 cm^{-1}, score 95 % avec 100:0), sans trace des bandes d'UR (NH_4^+ ou urate).

La couche 2 correspond à UR (bandes spécifiques, score 94 % avec 0:100), sans trace des bandes de COM (1612 cm^{-1}, 1311 cm^{-1}, 780 cm^{-1}). Cette séparation nette indique une précipitation séquentielle : COM dans un milieu à pH modérément acide, suivi d'UR dans un milieu riche en ammonium. Ces couches valident les structures stratifiées liées (chapitre 2, Figure 54).

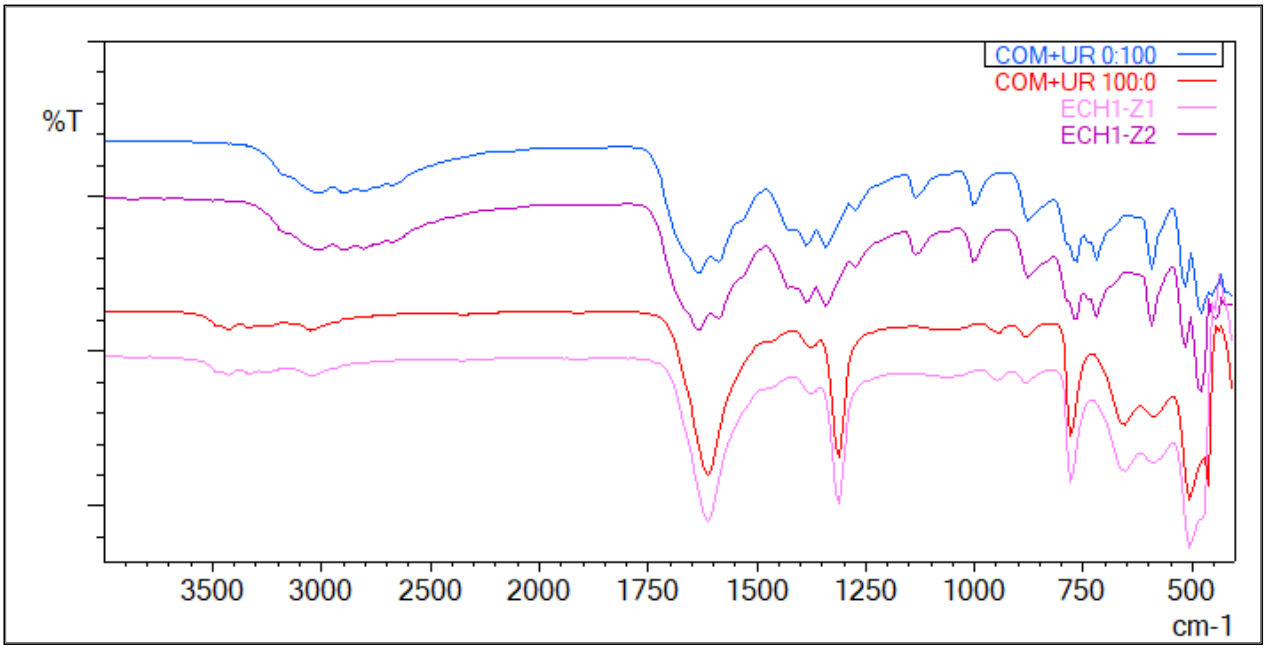


Figure 90 : Superposition des spectres des échantillons mixtes inter-famille avec les standard COM et UR

4.3 Lithiases phosphatées

Les lithiases phosphatées incluent trois composés principaux : l'apatite carbonatée (CAR, $Ca_{10}(PO_4)_6(OH,CO_3)_2$, sous-type IVa1 IVa2, friables), la brushite (BRU, $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$, sous-type IVd, striée), et la struvite (STR, $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$, sous-type IVc, crayeuse).

Les analyses par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et par analyse thermique couplée (TG+DSC+DTG) ont permis de caractériser leurs signatures chimiques et thermiques.

4.3.1 Analyse des échantillons réels

4.3.1.a Échantillon pur de brushite :

- **Spectroscopie infrarouge (FTIR)**

L'échantillon réel identifié comme étant de la brushite (BRU) pure a été analysé par FTIR pour confirmer sa composition et son homogénéité.

Le spectre a été comparé à un spectre de référence de brushite pure (fig 115), en se focalisant sur les bandes caractéristiques de BRU (3500–3100 cm^{-1}, νO-H ; 1210–1130 cm^{-1}, ν_3 HPO_4^{2-} ; 660–520 cm^{-1}, ν_4 HPO_4^{2-}).

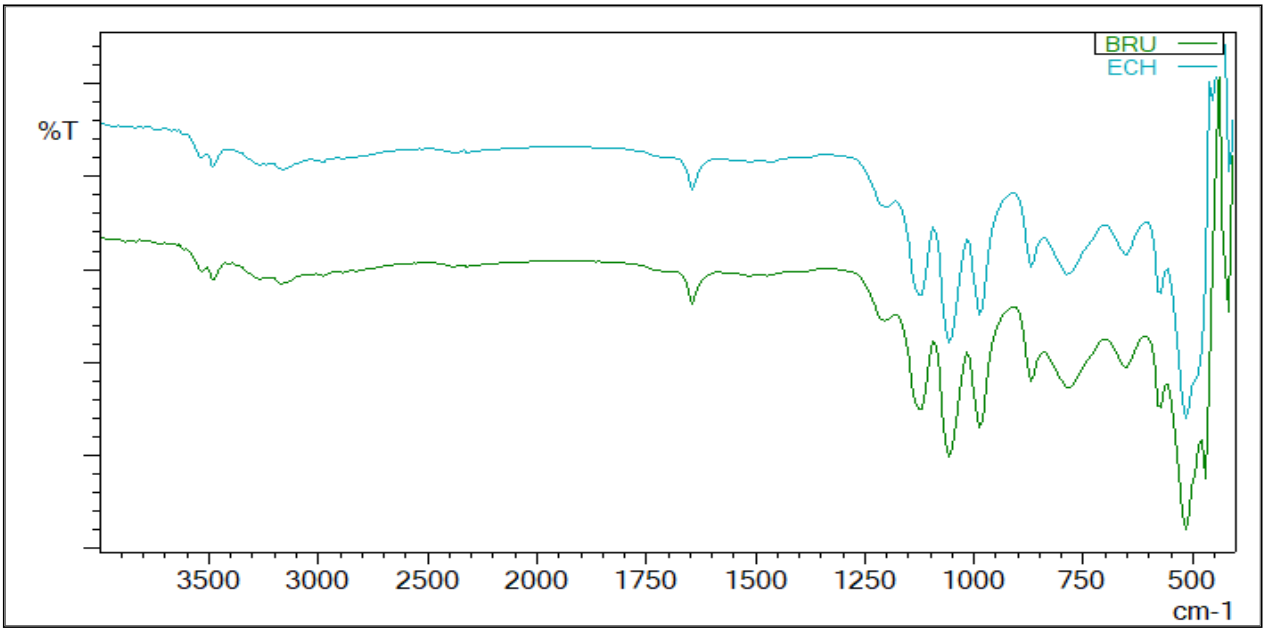


Figure 91 : Superposition des spectres de l'échantillon de brushite avec le standard BRU

L'échantillon présente un spectre typique de BRU, avec des bandes caractéristiques de la brushite, notamment celles associées aux vibrations des groupes HPO_4^{2-} et de l'eau coordonnée, telles que la large bande d'élongation des liaisons OH, les modes d'élongation et de flexion des groupes hydrogénophosphate, ainsi que les vibrations de libration de l'eau (score 98 % avec la référence BRU pure). Aucune trace de bandes étrangères, comme celles de CARB (CO_3^{2-} ou doublets PO_4^{3-}) ou de STR (NH_4^+ ou Mg-O), n'est respectée, confirmant la pureté de l'échantillon. Cette homogénéité indique une précipitation de brushite dans un milieu acide et riche en calcium et phosphate, sans interférence d'autres phases minérales. Ces résultats valident les caractéristiques structurales de la brushite pure décrites (chapitre 2, Figure 56).

4.3.1.b Mélange mixte CARB+STR

- **Spectroscopie infrarouge (FTIR)**

Les deux échantillons réels identifiés comme mélanges CARB+STR ont été analysés par FTIR pour confirmer leur composition et leur organisation. Selon l'analyse morphologique (chapitre 2, Figure 57), ces échantillons se présentent sous une seule forme distincte :

• Forme n°1 : Section avec deux couches distinctes (couche 1 = CARB, couche 2 = STR).

Les spectres ont été comparés aux mélanges artificiels de référence CARB+STR (0:100, 20:80, 50:50, 80:20, 100:0), en se focalisant sur les bandes caractéristiques de CARB (1411–1450 cm^{-1}, ν_3 CO_3^{2-} ; 1018 cm^{-1}, ν_3 PO_4^{3-} ; 601–555 cm^{-1}, ν_4 PO_4^{3-}) et de STR (1597 cm^{-1}, ν_3 PO_4^{3-} + δas NH_4^+ ; 748 cm^{-1}, libration H_2O ; 686 cm^{-1}, Mg-O).

L'échantillon a été analysé par couche. La couche 1 présente un spectre typique de CARB, avec des bandes caractéristiques de la carbonate-apatite, notamment celles associées au groupe CO_3^{2-} et au groupe PO_4^{3-}, ainsi que la vibration de l'eau adsorbée (score 96 % avec 100:0). Aucune trace des bandes de STR, comme celles du groupe NH_4^+ ou des vibrations spécifiques de Mg-O, n'est enregistrée dans cette couche.

La couche 2 correspond à STR, avec des bandes spécifiques de la struvite, incluant les vibrations des groupes NH_4^+, H_2O coordonnées et Mg-O (score 95 % avec 0:100), sans trace des bandes de CARB, telles que celles du groupe CO_3^{2-} ou les doublets de PO_4^{3-} typiques.

Cette séparation nette indique une précipitation séquentielle : CARB dans un milieu riche en carbonate et calcium, suivi de STR dans un milieu alcalin riche en ammonium et magnésium. Ces couches valident les structures stratifiées liées (chapitre 2, Figure 57).

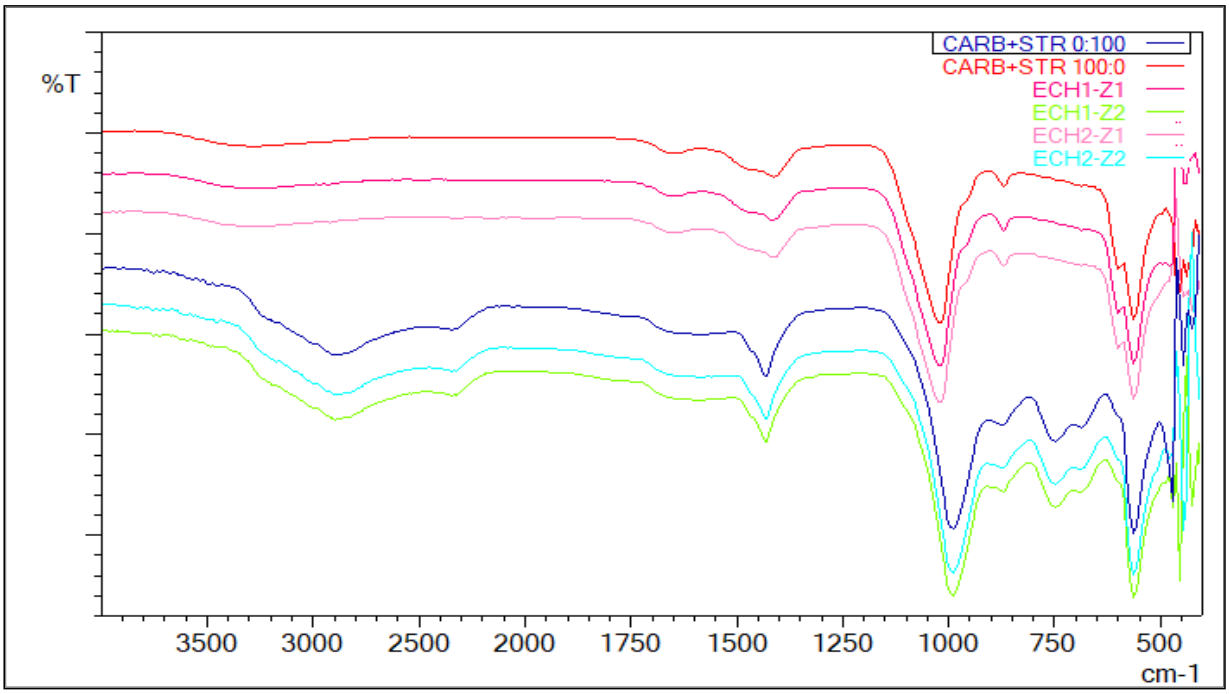


Figure 92 : Superposition des spectres des échantillons mixtes avec les standards CARB-STR

4.3.2 Analyse des mélanges inter-familles

4.3.2.a Analyse des échantillons réels inter-famille

- **Mélanges de COM+CARB**

Spectroscopie infrarouge (FTIR)

Les échantillons réels identifiés comme mélanges COM+CARB ont été analysés par FTIR pour confirmer leur composition et leur organisation. Selon l'analyse morphologique (chapitre 2, Figure 58), ces échantillons se présentent sous trois formes distinctes :

• **Forme n°1 :** Mélange intime en surface (1 échantillon) ;
• **Forme n°2 :** Mélange intime en section (4 échantillons) ;
• **Forme n°3 :** Section avec deux canapés distincts.

Les spectres ont été comparés aux mélanges artificiels de référence COM+CARB (0:100, 10:90, 20:80, 30:70, 40:60, 50:50, 60:40, 70:30, 80:20, 90:10, 100:0), en se focalisant sur les bandes caractéristiques de COM (1612 cm^{-1}, vas C=O ; 1311 cm^{-1}, vs C=O ; 780 cm^{-1}, δO-CO) et de CARB (1411–1450 cm^{-1}, ν_3 CO_3^{2-} ; 1018 cm^{-1}, ν_3 PO_4^{3-} ; 601-555 cm^{-1}, ν_4 PO_4^{3-}).

Forme n°1 : Mélange intime en surface (1 échantillon)

La superposition du spectre infrarouge de l'échantillon avec le mélange artificiel CARB+COM 20 :80 est présenté dans la figure ci-dessous

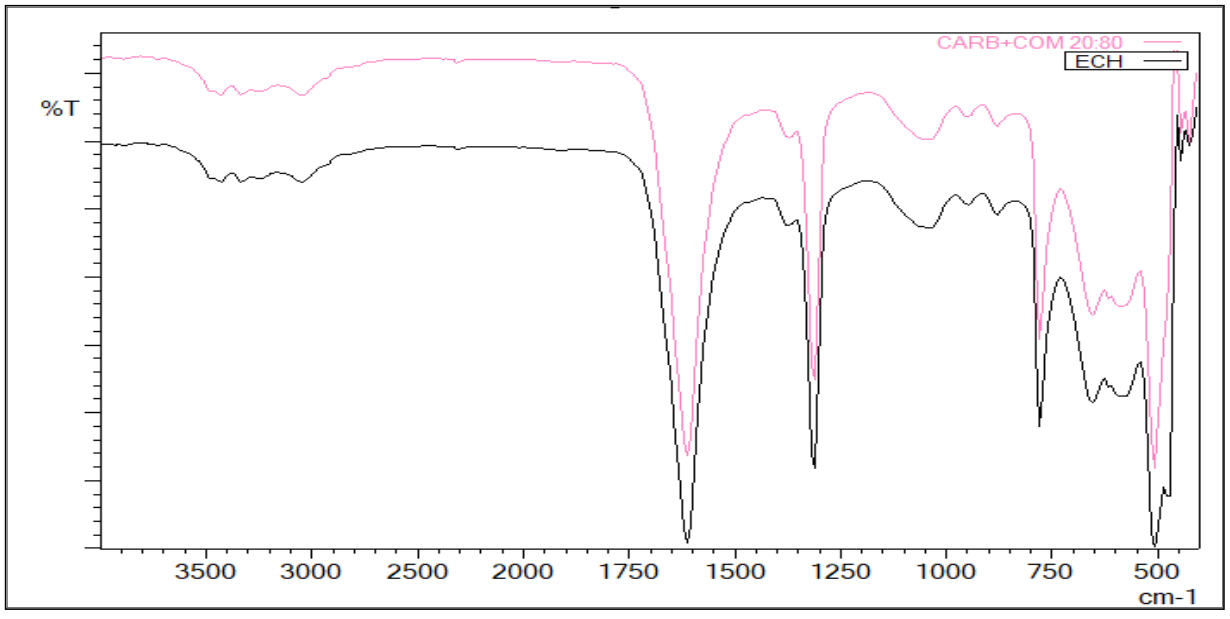


Figure 93 : Superposition de l'échantillon de mélange CARB+COM de la forme 1 avec le mélange artificiel CARB+COM 20:80

L'échantillon présente un spectre homogène combinant les bandes de COM (1612 cm^{-1}, vas C=O ; 1311 cm^{-1}, νs C=O ; 780 cm^{-1}, δO-CO) et de CARB (1411–1450 cm^{-1}, $\nu_3\ CO_3^{2-}$; 1018 cm^{-1}, $\nu_3\ PO_4^{3-}$; 601–555 cm^{-1}, $\nu_4\ PO_4^{3-}$), similaire au mélange artificiel CARB+COM dans une proportion de 20:80. Les proportions estimées sont proches de 20:80 (score de concordance 94 %), avec une intensité dominante pour la bande à 1612 cm^{-1} (COM) par rapport à 1018 cm^{-1} (CARB). Un léger élargissement à 1600–1612 cm^{-1} est observé, dû au chevauchement des vibrations vas C=O de COM et des vibrations de CARB. La bande à 780 cm^{-1} (COM) reste bien visible, tandis que les bandes de CARB (601–555 cm^{-1}) sont moins prononcées, reflétant une prédominance de COM. Ce mélange intime en surface suggère une co-précipitation dans des urines riches en oxalate avec une contribution modeste de carbonate, en cohérence avec la morphologie mixte observée (chapitre 2, Figure 58).

Forme n°2 : Mélange intime en section (4 échantillons)

Les quatre échantillons présentent un spectre homogène combinant les bandes de COM (1612 cm^{-1}, νas C=O ; 1311 cm^{-1}, νs C=O ; 780 cm^{-1}, δO-CO) et de CARB (1411–1450 cm^{-1}, $\nu_3\ CO_3^{2-}$; 1018 cm^{-1}, $\nu_3\ PO_4^{3-}$; 601–555 cm^{-1}, $\nu_4\ PO_4^{3-}$) à travers la section. Les proportions estimées varient entre 40:60 et 60:40 (score de concordance moyen 92 %), avec des intensités équilibrées pour 1612 cm^{-1} (COM) et 1411–1450 cm^{-1} (CARB). Un élargissement à 1600–1612 cm^{-1} est constatée, indiquant une co-précipitation homogène dans des conditions mixtes de sursaturation en oxalate et carbonate. Cette organisation en section suggère une formation simultanée dans un milieu stable (chapitre 2, figure 58).

Forme n°3 : Section avec deux couches distinctes

L'échantillon présente un spectre avec des bandes de COM à 1612 cm^{-1} (νas C=O), 1311 cm^{-1} (νs C=O), et 780 cm^{-1} (δO-CO) dans la couche 1 (score 96 % avec 100:0 COM), sans trace des bandes de CARB comme 1411–1450 cm^{-1} ou 601-555 cm^{-1}. La couche 2 correspond à CARB, avec des bandes spécifiques à 1411–1450 cm^{-1} ($\nu_3\ CO_3^{2-}$), 1018 cm^{-1} ($\nu_3\ PO_4^{3-}$), et 601–555 cm^{-1} ($\nu_4\ PO_4^{3-}$) (score 95 % avec 100:0 CARB), sans trace des bandes de COM comme 1612 cm^{-1} ou 780 cm^{-1}. Cette séparation nette indique une précipitation séquentielle, suggérant un milieu riche en oxalate pour COM, suivi d'un milieu riche en carbonate et phosphate pour CARB. Ces couches valident les structures stratifiées liées (chapitre 2, Figure 58).

4.3.2.b CARB+ COD

- **Spectroscopie infrarouge (FTIR)**

Les échantillons réels identifiés comme mélanges CARB+COD ont été analysés par FTIR pour confirmer leur composition et leur organisation. Selon l'analyse morphologique (chapitre 2, Figure 59), ces échantillons se présentent sous deux formes distinctes :

• **Forme n°1 :** Mélange intime en surface (4 échantillons).

• **Forme n°2 :** Mélange intime en section (3 échantillons).

Les spectres ont été comparés aux mélanges artificiels de référence COD+CARB (0:100, 20:80, 50:50, 80:20, 100:0), en se focalisant sur les bandes caractéristiques de COD (1640 cm^{-1}, νas C=O ; 1320 cm^{-1}, νs C=O ; 780 cm^{-1}, δO-CO) et de CARB (1411-1450 cm^{-1}, $\nu_3\ CO_3^{2-}$; 1018 cm^{-1}, $\nu_3\ PO_4^{3-}$; 601-555 cm^{-1}, $\nu_4\ PO_4^{3-}$).

Forme n°1 – Mélange intime en surface (4 échantillons)

Les quatre échantillons présentent un spectre homogène combinant les bandes de COD (1640 cm^{-1}, νas C=O ; 1320 cm^{-1}, νs C=O ; 780 cm^{-1}, δO-CO) et de CARB (1411–1450 cm^{-1}, $\nu_3\ CO_3^{2-}$; 1018 cm^{-1}, $\nu_3\ PO_4^{3-}$; 601–555 cm^{-1}, $\nu_4\ PO_4^{3-}$) en surface. Les proportions estimées varient entre 30:70 et 50:50 (score de concordance moyen 93 %), avec des intensités équilibrées pour 1640 cm^{-1} (COD) et 1018 cm^{-1} (CARB). Un élargissement à 1600–1640 cm^{-1} est observée, due au chevauchement des vibrations νas C=O de COD et des vibrations de CARB. La bande à 780 cm^{-1} (COD) et le doublet à 601–555 cm^{-1} (CARB) confirment la présence des deux phases. Ce mélange intime en surface suggère une co-précipitation dans des urines à pH intermédiaire, avec une sursaturation mixte en oxalate et carbonate, en cohérence avec la morphologie mixte observée (chapitre 2, Figure 59).

Forme n°2 – Mélange intime en section (3 échantillons)

Les trois échantillons présentent un spectre homogène combinant les bandes de COD (1640 cm^{-1}, νas C=O ; 1320 cm^{-1}, νs C=O ; 780 cm^{-1}, δO-CO) et de CARB (1411–1450 cm^{-1}, $\nu_3\ CO_3^{2-}$; 1018 cm^{-1}, $\nu_3\ PO_4^{3-}$; 601–555 cm^{-1}, $\nu_4\ PO_4^{3-}$) à travers la section. Les proportions estimées varient entre 40:60 et 60:40 (score de concordance moyen 92 %), avec des intensités équilibrées pour 1640 cm^{-1} (COD) et 1411–1450 cm^{-1} (CARB). Un élargissement à 1600–1640 cm^{-1} est constatée, indiquant une co-précipitation homogène dans des conditions mixtes de sursaturation en oxalate et carbonate. Cette organisation en section suggère une formation simultanée dans un milieu stable (chapitre 1, figure 51).

5 CONCLUSION

L'étude spectroscopique (IRTF) et thermique (DSC) des standards, des mélanges et des échantillons réels a permis de caractériser avec précision les phases chimiques constituant les lithiases urinaires. Grâce à la bibliothèque construite à partir de standards purs et de mélanges binaires et tertiaires, les spectres infrarouges ont pu être interprétés avec plus de fiabilité, même en cas de superposition de bandes. Les analyses DSC ont apporté un complément thermique utile, en confirmant certaines transitions spécifiques à chaque composé. La comparaison entre les profils spectraux des échantillons pathologiques et ceux des standards a mis en évidence la complexité des formes mixtes, souvent invisibles à l'œil nu. Ce chapitre montre ainsi que l'approche couplée IR/DSC est pertinente pour affiner l'analyse qualitative des lithiases et mieux comprendre leur structure zonale.

CHAPITRE IV

Analyse statistique et chimiométrique des déterminants morpho-cliniques et spectroscopiques des lithiases urinaires

1 Introduction

L'analyse des lithiases urinaires repose traditionnellement sur des approches morphologiques et physico-chimiques pour identifier leur composition et comprendre leurs mécanismes de formation. Cependant, la complexité des échantillons, souvent mixtes et hétérogènes, nécessite des méthodes statistiques avancées pour intégrer et interpréter un grand volume de données issues de différentes sources

La chimiométrie, combinant statistiques univariées et multivariées, mathématiques et chimie analytique, permet d'extraire des informations qualitatives et quantitatives pertinentes à partir des spectres de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), particulièrement adaptée pour détecter les signatures moléculaires des composés minéraux et organiques des calculs. Ce chapitre vise à :

- Explorer les relations entre les variables morphologiques, spectroscopiques, cliniques et biochimiques des lithiases urinaires ;
- Identifier les associations significatives pour le diagnostic et l'étude des facteurs étiopathogéniques ;
- Modéliser quantitativement la composition des calculs à partir des spectres FTIR, à l'aide d'algorithmes de régression et de techniques de sélection de variables ;
- Explorer la structure globale des données spectrales par ACP afin de visualiser la répartition des classes chimiques dans l'espace des composantes principales ;
- Développer des modèles prédictifs robustes pour quantifier la composition des calculs à partir des spectres FTIR, à l'aide d'algorithmes de régression et de techniques de sélection de variables.

Ces analyses permettent d'affiner l'interprétation des résultats classiques, de poser les bases d'un diagnostic assisté par données, plus rapide, fiable et automatisable. Ce chapitre est structuré en trois parties : les méthodes chimiométriques utilisées, les résultats obtenus avec leur interprétation, et une conclusion sur leur apport au diagnostic des lithiases urinaires.

2 Matériel et Méthodes

2.1 Données utilisées

L'étude chimiométrique a porté sur un total de **105 lithiases urinaires** analysées. Pour chaque échantillon, un ensemble de variables a été collecté à partir de différentes sources :

- **L'analyse morphologique macroscopique selon la classification de Daudon :**

Observations de la couleur, la surface, la texture, la porosité, la stratification et la structure, évaluées pour :

- Surface : Zones 1, 2 et 3 ;
- Section : Couche interne, couche profonde 1 et couche profonde 2 ;
- Noyau : Caractéristiques spécifiques.

- **La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (SPIR) :**
  - Un total de 257 échantillons réels de calculs (de différentes couches) ont été analysés par spectroscopie infrarouge FTIR, avec six mesures répétées par échantillon, conduisant à 1542 spectres au total ;
  - Un ensemble de 161 standards (composés purs, mélanges binaires et tertiaires), chacun mesuré six fois, a permis de générer 966 spectres de référence.

Le nombre total de nombres d'onde (variables prédictives) : 467 nombres d'onde

- **Un questionnaire renseigné par le patient :**
  - Facteurs de risque : Antécédents personnels et familiaux de lithiase, habitudes alimentaires (Annexe 1)
  - Données anthropométriques : âge, sexe, indice de masse corporelle (IMC).
  - Traitements médicamenteux : information sur les traitements en cours, en lien avec l'étiologie potentielle de la lithiase.

- **Des données cliniques et biologiques issues du dossier médical :**
  - Concentrations de paramètres biologiques pertinents pour la lithiase urinaire.

L'ensemble des données a été organisé dans une matrice numérique standardisée (échantillons × variables), avec un codage approprié des variables catégoriques. Cette matrice a été exportée vers des logiciels d'analyse pour les étapes chimiométriques.

2.2 Outils et logiciels utilisés

L'analyse des données multidimensionnelles et la modélisation chimiométrique ont été réalisées à l'aide des logiciels suivants :

- **Microsoft Excel 2021** : utilisé pour l'organisation des données brutes, et la création de tableaux récapitulatifs, et l'exportation des matrices de données ;
- **R v 4.22** et **RStudio :** Employé pour les analyses bivariées (tests de Chi², ANOVA, Student, corrélations, etc.), les méthodes de sélection de variables (Random Forest, Lasso, ANOVA, etc.), et les représentations graphiques ;
- **The Unscrambler X 10.4** : Logiciel dédié à la chimiométrie, utilisé pour implémenter les régressions PLS et SVR, grâce à son interface optimisée pour l'analyse spectrale ;
- **NCSS v10.0.9 :** utilisé pour l'application de la régression Ridge ;
- **Python-3.12.2** : utilisé en complément pour certaines modélisations, la génération de visualisations et comparaisons de performances.

3 MÉTHODES

La méthodologie chimiométrique a été structurée en trois étapes distinctes : pré-analytique, analytique et post-analytique. Cette approche a permis d'exploiter de manière intégrée l'ensemble des données collectées — spectrales, morphologiques, et cliniques et biologiques — à l'aide d'analyses statistiques bivariées et multivariées.

Les analyses ont permis, d'une part, d'étudier les relations entre les caractéristiques morphologiques des calculs urinaires et les paramètres issus du questionnaire clinique, incluant les facteurs de risque identifiés, les données anthropométriques (âge, sexe, IMC) et les traitements médicamenteux déclarés. D'autre part, les spectres infrarouges ont été utilisés pour prédire quantitativement les concentrations des constituants principaux des calculs. Les performances des modèles prédictifs ont été évaluées à l'aide d'indicateurs statistiques rigoureux.

3.1 Étape pré-analytique

3.1.1 Codage et prétraitement des données :

Dans cette phase préliminaire, l'ensemble des données issues des différentes analyses (morphologiques, spectroscopiques, cliniques et biologiques) a été préparé (la sélection des

données pertinentes, leur nettoyage, leur codage et leur organisation) en vue de leur traitement chimiométrique, pour garantir leur qualité et leur compatibilité avec les méthodes statistiques.

3.1.1.a Collecte des données :

Comme détaillé dans les chapitres précédents, les 105 calculs urinaires ont été recueillis, analysés morphologiquement, et leurs spectres FTIR exportés dans des tableaux Excel.
Les données cliniques et biologiques ont été consignées dans un tableau (Annexes 4-5-6) à l'aide de Microsoft Excel.

3.1.1.b Traitement des données morphologiques

Les caractères morphologiques des lithiases, identifiés à l'aide de la classification de Daudon, ont été codés pour l'analyse statistique.
Chaque caractéristique (couleur, aspect de surface, structure interne, etc.) a été transformée en :

- **Variable qualitative binaire** (présence/absence 1/0) : de caractéristiques spécifiques (par exemple, cristaux bipyramidaux épais).
- **Variable qualitatives nominales :** couleurs (jaune, brun, beige à orange), surfaces (lisse, rugueuse, cristalline).

Afin d'optimiser l'analyse :

- Les variables constantes (c'est-à-dire identiques pour l'ensemble des échantillons ou ne présentant aucune variation exploitable) ont été éliminées.
- Les variables présentant des profils de variation très similaires (corrélées de manière quasi parfaite, avec un coefficient de détermination $R^2 \geq 0,9$) ont été regroupées ou représentées par une variable unique, dans le but de réduire la dimensionnalité et de limiter les effets de multicolinéarité dans les analyses ultérieures.

3.1.1.c Prétraitement des spectres FTIR

Les 2508 spectres infrarouges (FTIR) (1542 échantillons, 966 standards), ont été soumis à plusieurs étapes de traitement pour améliorer la qualité des signaux et assurer leur exploitation dans les modèles quantitatifs :

- **Correction de la ligne de base** : Soustraction polynomiale (degré 2) pour éliminer les dérives spectrales dues aux effets instrumentaux ou à la diffusion.

- **Lissage** : Un lissage des spectres a été appliqué à l'aide du filtre de Savitzky-Golay (fenêtre de 5 points) afin de réduire le bruit haute fréquence tout en préservant les caractéristiques spectrales essentielles.
- **Normalisation** : Normalisation vectorielle (moyenne = 0, écart-type = 1) pour uniformiser les intensités et les échelles entre échantillons et réduire les variations dues à la concentration ou à l'épaisseur des échantillons.
- **Déconvolution** : Séparation des pics superposés (1000–1500 cm^{-1}) via ajustement de courbes gaussianes/lorentziennes.
- **Moyennage** : Les 6 répétitions par échantillon et standard ont été moyennées pour un spectre représentatif pour la régression afin de réduire le bruit, avec conservation des données brutes pour chimiométrie pour la sélection de variables.
- **Réduction du domaine spectral** à la fenêtre informative pertinente (en excluant les régions non exploitables ou bruitées).

Ces étapes ont été appliquées de façon systématique à tous les spectres, qu'il s'agisse de standards, de mélanges ou d'échantillons réels.

3.1.1.d Prétraitement des données cliniques et biologiques :

Les données cliniques et biologiques ont été intégrées dans la base de données globale, puis vérifiées et transformées selon les étapes suivantes :

- **Codage des variables cliniques** :

- **Binaires** : sexe, présence d'antécédents familiaux, infections urinaires, etc. (0/1).
- **Nominales** : régime alimentaire, pathologies associées.
- **Ordinales** : sévérité des symptômes, fréquence des récidives (codées 1, 2, 3).

- **Standardisation des données biologiques** :

- Les paramètres quantitatifs (créatininémie, calciurie, pH urinaire) ont été conservés sous forme numérique ;
- Harmonisation des unités (mg/L, g/l, mmol/24h,) ;

3.2 Étape analytique :

Cette phase correspond à l'application des tests statistiques et des modèles de régression visant à identifier des relations significatives entre les variables, ou à prédire la composition des lithiases.

3.2.1 Analyse bivariée des relations entre variables :

Objectif : identifier les relations significatives ($p < 0,05$), entre deux variables (morphologie, données cliniques/biologiques).

Les tests suivants ont été appliqués selon la nature des variables :

- **Comparaison entre variables qualitatives binaires :**
  - **Le test du Chi²** a été utilisé dans les cas standards, par exemple pour évaluer l'association entre la texture rugueuse et la présence d'anomalies médicales ;
  - **Le test exact de Fisher** a été appliqué lorsque les effectifs attendus étaient inférieurs à 5 ;
  - **Coefficient Phi** (équivalent du coefficient de corrélation pour des variables binaires) a été calculé pour estimer la force de l'association.
- **Comparaison entre variables qualitatives nominales**
  - Le test du Chi² pour tester l'indépendance ;
  - La valeur de V de Cramér pour évaluer l'intensité du lien (faible si <0,2 ; modéré entre 0,2 et 0,4 ; fort >0,4).
- **Comparaison entre variables quantitatives :**
  - Le coefficient de corrélation linéaire de Pearson (r) a été calculé ;
  - Une régression linéaire simple, avec estimation du coefficient de régression Béta.
- **Étude des variables quantitatives en fonction de variables binaires :**
  - Un test de Levene a d'abord été effectué pour vérifier l'égalité des variances.
  - Ensuite, un test de Student (ou sa version corrigée si hétéroscédasticité) a été appliqué pour comparer les moyennes.
- **Étude des variables quantitatives en fonction de variables nominales**
  - Une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée ;
  - Test de Levene préalable pour choisir entre test de Fisher (variances égales) ou Welch (variances inégales) pour comparer les groupes (par exemple, uricémie par zone de surface).

- **Étude des variables nominales en fonction des variables binaires :**
  - **Le test du Chi²** a été appliqué avec seuil de significativité à **p < 0,05**.

Seules les associations présentant une signification statistique (p < 0,05) ont été prises en compte dans l'interprétation des résultats.

3.2.2 Analyses multivariées et chimiométriques :

Cette étape avait pour objectif principal le développement de modèles quantitatifs permettant d'estimer les concentrations des composés à partir des spectres FTIR, en s'inscrivant dans une approche allant au-delà de la simple classification qualitative.

3.2.2.a Modèles de régression

Trois méthodes de régression multivariée ont été testées :

- **Partial Least Squares PLS :**

Une validation croisée en k-fold (avec k = 5) a été appliquée de manière systématique à l'ensemble des modèles PLS, quel que soit le composé étudié.

Critères évalués : coefficient de détermination R^2, RMSE (Root Mean Square Error), et erreur moyenne absolue (MAE).

- **Régression Ridge :**
  - **Choix de l'hyperparamètre lambda** : optimisé via validation croisée.
- **Régression SVR (Support Vector Regression)**
  - **Noyau utilisé** : un noyau radial de base (RBF) a été choisi ;
  - **Optimisation des hyperparamètres (C, epsilon, gamma)** : réalisée par recherche sur grille avec validation croisée.
  - **L'optimisation des hyperparamètres C et ε (epsilon)** a été réalisée par recherche sur grille combinée à une validation croisée (k-fold). Les plages explorées étaient respectivement : $C \in [0,1 ; 10]$, $\varepsilon \in [0,01 ; 0,2]$. Le paramètre gamma (γ), qui contrôle l'influence d'un point d'entraînement sur la fonction de décision, n'a pas été optimisé par validation croisée. Il a été défini automatiquement selon la formule suivante :

$$\gamma = 1 / (n \times \mathrm{Var}(X))$$

Où n correspond au nombre de variables et Var(X) à la variance moyenne des variables d'entrée. Cette approche vise à adapter gamma à l'échelle des données sans nécessiter de réglage manuel.

- **Sélection des variables spectrales :**

Cinq méthodes de sélection de variables ont été appliquées pour réduire le nombre de nombres d'onde (467 initiales) et améliorer la robustesse des modèles :

- **ANOVA univariée** : Sélection des 20 meilleures variables (celles avec les plus grands scores F) ;
- **Corrélation simple** : Sélection des 10 meilleures variables (celles avec le coefficient de corrélation le plus élevé) ;
- **Lasso (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)** : La régression Lasso applique une pénalité de type L1, ce qui permet de contraindre certains coefficients à zéro et ainsi de réaliser une sélection automatique des variables pertinentes.

  Le paramètre de régularisation alpha (α) a été exploré dans l'intervalle [0,01 ; 10] et sélectionné par validation croisée (k-fold, avec k = 5) ;
- **Random Forest** : Un modèle basé sur 100 arbres de décision a été utilisé pour estimer l'importance des variables, sur la base de leur contribution à la réduction de l'erreur prédictive.

  Les 20 à 30 % des nombres d'onde les plus influentes ont d'abord été identifiées, puis les 10 variables les plus importantes ont été sélectionnées pour les analyses ultérieures.
- **RFE (Recursive Feature Elimination)** : élimination itérative des variables les moins importantes avec SVR ou Ridge ou PLS selon une stratégie récursive.

Chaque méthode a été combinée avec les trois modèles, et un modèle Full (toutes les nombres d'onde) a été inclus, soit 18 combinaisons.

3.2.2.b Évaluation des performances

Pour chaque méthode, les performances ont été évaluées sur :

- **La sous-collection d'apprentissage (SC) :** représentant 80 % des données, a été utilisée pour l'entraînement des modèles à l'aide d'une validation croisée à 5 folds, permettant d'optimiser les hyperparamètres tout en évaluant la stabilité du modèle.
- **La sous-collection de validation (SV) :** constituée des 20 % restants, a été utilisée de manière totalement indépendante pour estimer la capacité de généralisation des modèles entraînés.

Les critères retenus :

- R^2 (coefficient de détermination) ;
- RMSE (Root Mean Square Error) ;
- MAPE (Mean Absolute Percentage Error).

3.2.2.c Analyse en Composantes Principales (ACP)

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été réalisée sur les spectres FTIR des 257 échantillons réels afin de réduire la dimensionnalité des données spectrales et d'explorer leurs structures latentes.

Les spectres ont été préalablement traités (lissage, normalisation, réduction du domaine spectral) puis utilisés comme variables prédictives. La variable réponse utilisée à des fins de visualisation était le composé majoritaire identifié par les méthodes chimiométriques.

Les composés majoritaires prédits par les modèles de régression ont été utilisés comme variable de regroupement pour visualiser la distribution des échantillons dans l'espace des composantes principales. Cette approche a permis d'évaluer la capacité des spectres FTIR à différencier les profils chimiques de manière non supervisée.

3.3 Étape post-analytique : interprétation, sélection et validation des modèles

Cette étape a consisté à comparer les performances des différents modèles multivariés selon les composés lithiasiques analysés, à sélectionner les meilleures combinaisons "modèle + méthode de sélection", à interpréter les variables spectrales impliquées dans la prédiction, et à évaluer la robustesse des modèles sur des échantillons réels.

- **Sélection des meilleurs modèles par composé :** à partir des meilleures performances observées pour chaque composé, selon les métriques R^2_SV, RMSE_SV et MAPE_SV.
  - **Critères utilisés :**
    - **R^2 élevé** → bonne capacité explicative.
    - **RMSE faible** → erreurs de prédiction minimales.
    - **MAPE faible** → erreur moyenne relative maîtrisée (idéalement < 20 %).
    - Priorité aux modèles avec **R^2 > 0,90** et **RMSE + MAPE faibles**.
    - Le modèle le plus robuste est retenu sur la base du plus faible écart entre la performance en apprentissage (SC) et en validation (SV), évalué notamment via le ratio RMSECV/RMSEV.

Le modèle optimal correspond au meilleur compromis entre R^2, RMSE et MAPE sur les données de validation SV

- **Validation des prédictions sur les échantillons réels**

Tester les modèles optimisés sur des **échantillons cliniques réels** (n = 257) ;

Évaluer la **faisabilité et la précision** en condition réelle.

- Application des **meilleurs modèles par composé** sur les spectres FTIR réels ;

- Comparaison des résultats avec l'identification initiale (expertise visuelle et spectrale).

- **Visualisation des profils chimiques par ACP**
  - Regroupement des échantillons selon les composés majoritaires prédits par les modèles de régression ;
  - Projection des données dans l'espace des composantes principales pour visualiser la distribution inter-classes ;
  - Évaluation visuelle de la capacité des spectres FTIR à différencier les types chimiques de calculs de manière non supervisée.

4 Résultats et Discussion

4.1 Résultats des analyses bivariées

Les analyses statistiques bivariées ont été réalisées pour explorer les relations entre les variables morphologiques, cliniques, et biologiques des 105 lithiases urinaires, en s'appuyant sur les données décrites dans la section Matériel. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux synthétiques et des représentations graphiques générées dans Python (matplotlib, seaborn), avec des interprétations intégrées pour contextualiser les associations dans le cadre des lithiases urinaires.

4.1.1 Comparaisons par paires des variables qualitatives binaires

L'analyse des variables qualitatives binaires a permis de dégager plusieurs associations statistiquement significatives entre les caractéristiques morphologiques macroscopiques des calculs et certaines variables cliniques telles que le sexe, les anomalies médicales, les antécédents ou les infections urinaires.

Le tableau complet des 98 comparaisons est disponible en Annexe 8. Pour une présentation synthétique, le Tableau 35 regroupe les associations significatives organisées par catégorie (sexe, infection, historique, anomalie métabolique, morphologie), en sélectionnant des relations pertinentes sur la base de la p-value du test de Chi^2 ($p \leq 0,05$), Fisher ($p \leq 0,05$) et d'un coefficient Phi élevé ($\geq 0,20$). Toutefois, 'Sexe - Surface crayeuse' (p Fisher = 0,0400) est conservé pour son intérêt clinique potentiel, malgré un Phi de 0,179, car le test de Fisher, plus précis, indique une significativité contrairement au test de Chi^2 (p = 0,0668). Les p-valeurs issues des tests de Chi^2 et de Fisher sont toutes deux rapportées afin de comparer leur comportement, le test de Fisher étant interprété en priorité en cas de divergence, en raison de sa meilleure précision.

Tableau 28 . Associations significatives entre variables qualitatives binaires par catégorie

Catégorie	Variable 1	Variable 2	Test	Statistique	p-value Chi²	p-value Fisher	Phi
Sexe	Sexe	Surface crayeuse	Fisher	3.359	0,0668	0,0400	0,179
		Surface mamelonnée	Chi²	5,255	0,0219	0,0111	0,224
Infection	Infection urinaire	Surface crayeuse	Chi²	13,98	0,0002	0,0007	0,365
Historique	Historique de lithiase	Anomalie métabolique	Chi²	9,991	0,0016	0,0008	0,309
		Couleur brun foncé	Chi²	6,662	0,0099	0,0070	0,252
Anomalie métabolique	Anomalie métabolique	Prise de médicaments	Chi²	7,144	0,0075	0,0064	0,261
		Couleur brun-jaune clair	Chi²	6,648	0,0099	0,0059	0,252
Morphologie	Surface ombilification	Plaque de Randall	Chi²	58,59	<0,0001	<0,0001	0,747
	Surface mamelonnée	Couleur brun foncé	Chi²	6,662	0,0099	0,0099	0,252
	Surface lisse	Couleur brun foncé	Chi²	39,11	<0,0001	<0,0001	0,610
	Surface rugueuse	Aspect	Chi²	18,06	<0,0001	<0,0001	0,415
	Surface brillance	Couleur jaune clair	Chi²	81,16	<0,0001	<0,0001	0,879

Phi > 0,3 indique une association forte, 0,2–0,3 une association modérée, <0,2 une association faible.

La Figure 120 présente une heatmap avec une gradation continue des coefficients Phi (0 à 0,879) pour les associations du Tableau 35, où les intensités de bleu (foncé pour $p < 0,001$, clair pour $p < 0,05$) indiquent la significativité, les seuils > 0,3 soulignant les associations fortes.

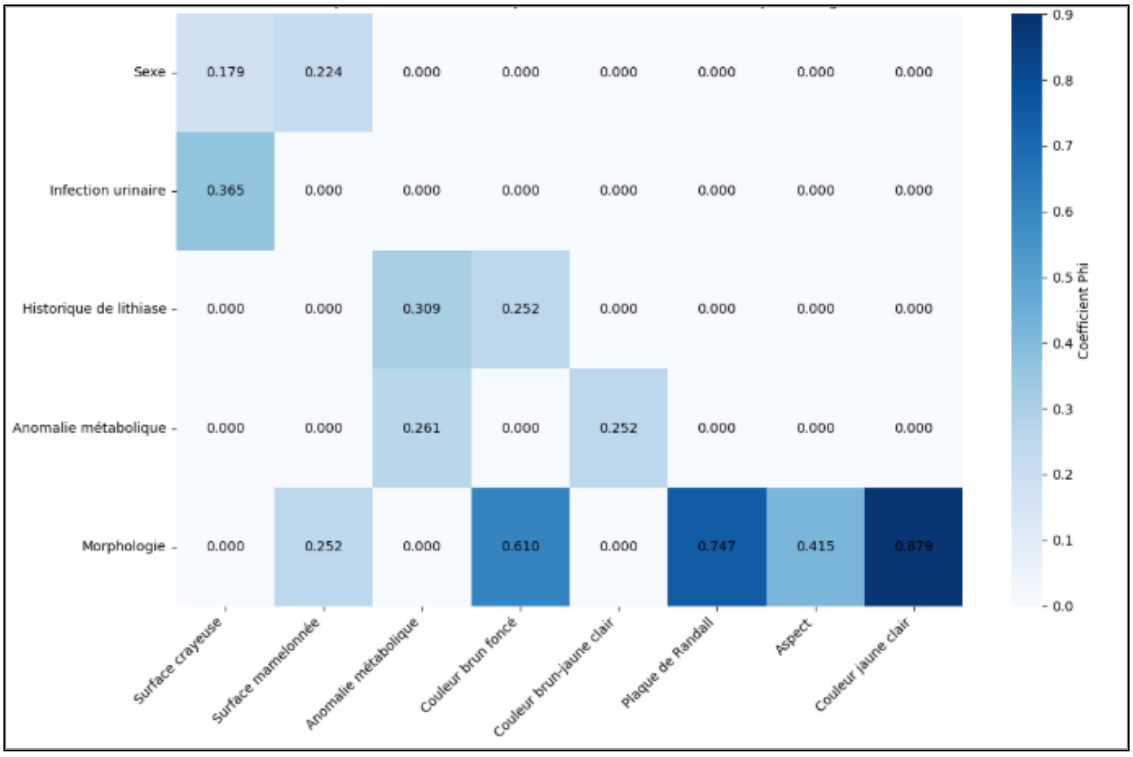


Figure 94: Heatmap des coefficients Phi pour les associations binaires par catégorie

Un diagramme de réseau réseau circulaire optimisé (Figure 121), illustre les associations significatives du Tableau 35, avec les nœuds regroupés par catégorie (clinique : bleu clair, morphologique : orange clair) regroupés dans des segments distincts pour minimiser les croisements d'arêtes. Les arêtes sont colorées selon la significativité (bleu foncé pour $p < 0,001$, bleu clair pour $p < 0,05$) et étiquetées avec les Phi.

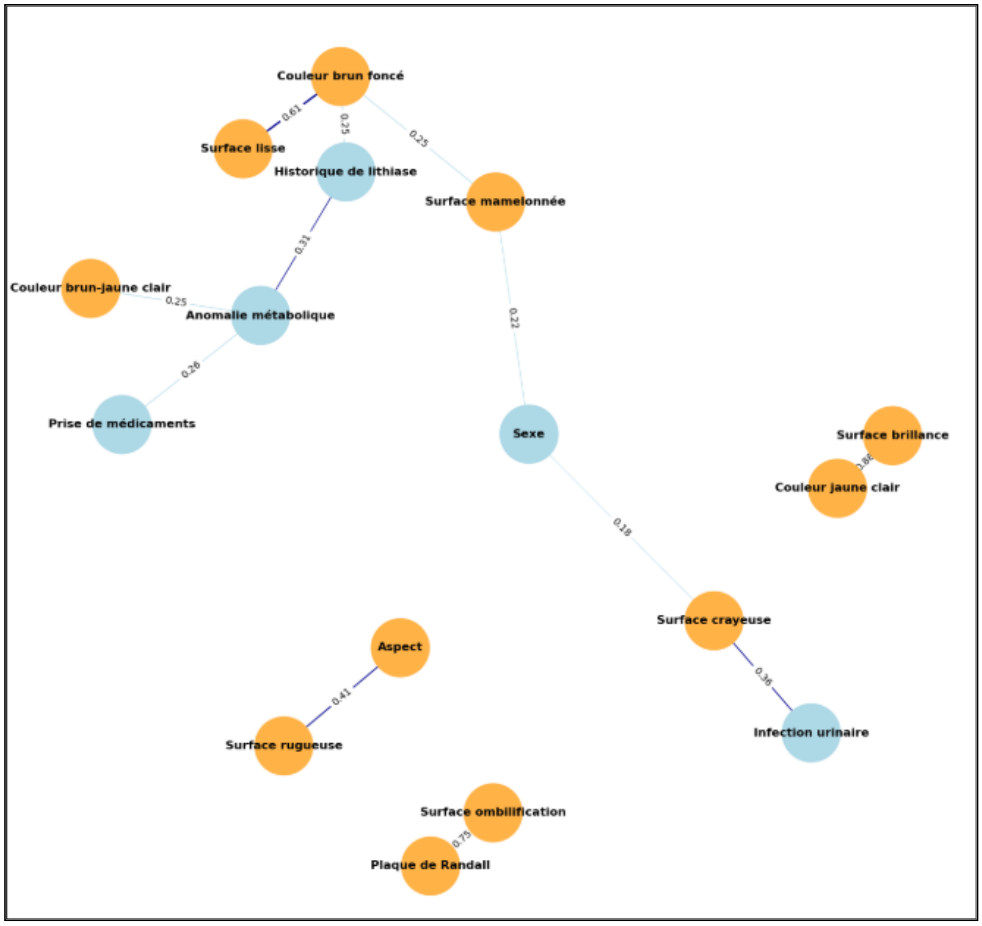


Figure 95 : Réseau circulaire des associations significatives entre variables qualitatives binaires

Les associations significatives mises en évidence dans le Tableau 35, illustrées dans les Figures 120 et 121 révèlent des relations clés dans le contexte de la lithiase urinaire.

Une analyse point par point des associations les plus significatives est présentée ci-dessous :

- **Sexe du patient**

- **Sexe – Surface crayeuse (Phi = 0,179, p Chi² = 0,0668, p Fisher = 0,0400)**

Bien que le caractère crayeux n'ait pas atteint la significativité statistique selon le test du Chi² (p = 0,0668), le test exact de Fisher, plus précis pour ce type de données, indique une association significative (p = 0,0400). Cette divergence souligne l'importance d'interpréter en priorité les résultats du test de Fisher lorsque les conclusions diffèrent.

L'association observée, bien que faible (Phi = 0,179), suggère que les calculs crayeux « souvent composés de struvite ou de carbapatite » sont plus fréquents chez les femmes, probablement en lien avec une prévalence accrue des infections urinaires.

- **Sexe – Surface mamelonnée (Phi = 0,224, p Chi² = 0,0219, p Fisher = 0,0111)**

Cette association modérée indique que les calculs mamelonnés, typiquement d'oxalate de calcium monohydraté, sont plus fréquents chez les hommes, en raison de l'hyperoxalurie masculine. Cette relation soutient l'utilisation de la morphologie pour orienter le diagnostic par sexe.

- **Infection urinaire – Surface crayeuse (Phi = 0,365, p Chi² = 0,0002, p Fisher = 0,0007)**

Cette association forte confirme que les calculs à surface crayeuse sont liés aux infections urinaires, dues à des bactéries uréasiques (par exemple, Proteus) créant un milieu alcalin favorable à STRUVITE ou CARBAPATITE. Ce résultat souligne l'importance des antécédents infectieux.

- **Historique de lithiase**

- **Historique de lithiase – Anomalie métabolique (Phi = 0,309, p Chi² = 0,0016, p Fisher = 0,0008)**

Cette association forte indique que les patients avec un historique de lithiase sont plus susceptibles de présenter une anomalie métabolique (par exemple, hypercalciurie, hyperuricémie-hyperparathyroïdie Iaire), favorisant la récidive. Cette relation est cruciale pour identifier les patients à risque.

- **Historique de lithiase – Couleur brun foncé (Phi = 0,252, p Chi² = 0,0099, p Fisher = 0,0070)**

Cette association modérée suggère que les calculs brun foncé, correspondant à l'oxalate de calcium monohydraté, sont plus fréquents chez les patients avec un historique de lithiase, probablement en raison d'un terrain métabolique prédisposant (par exemple, hyperoxalurie ou une hyporcalciurie). Ce résultat renforce la couleur comme marqueur diagnostique.

- **Anomalie métabolique**

- **Anomalie métabolique – Prise de médicaments (Phi = 0,261, p Chi² = 0,0075, p Fisher = 0,0064)**

Cette association modérée indique que les patients avec anomalies métaboliques (par exemple, hyperuricémie) sont plus souvent sous traitement (par exemple, allopurinol). Ce lien met en évidence l'impact des anomalies métaboliques sur la thérapeutique.

- **Anomalie métabolique – Couleur brun-jaune clair (Phi = 0,252, p Chi² = 0,0099, p Fisher = 0,0059)**

Cette association modérée suggère que les calculs brun-jaune clair, associés à l'oxalate de calcium dihydraté, sont liés à des anomalies métaboliques, notamment l'hypercalciurie. Cette relation est un marqueur indirect des troubles métaboliques.

- **Relations entre caractères morphologiques** :

- **Surface ombilification – Plaque de Randall (Phi = 0,747, p Chi² < 0,0001, p Fisher < 0,0001)**

Cette association forte montre que les calculs présentant une ombilification de surface (caractéristique de dépression centrale) sont fréquemment associés à la présence de plaques de Randall, des dépôts calciques sous-épithéliaux liés à la lithiase rénale. Cette relation est conforme à la littérature, où les plaques de Randall sont souvent associées à des calculs d'oxalate de calcium, dont l'ombilification est une caractéristique typique. Cette association suggère un mécanisme de formation commun, où les plaques de Randall servent de point d'ancrage pour la croissance des calculs. La force élevée de l'association renforce l'utilité de l'ombilification comme marqueur morphologique pour identifier les calculs calciques.

- **Surface mamelonnée – Couleur brun foncé (Phi = 0,252, p Chi² = 0,0099, p Fisher = 0,0099)**

Cette association modérée indique que les calculs mamelonnés et brun foncé correspondent à l'oxalate de calcium monohydraté de type Ia, reflétant des conditions métaboliques spécifiques (par exemple, hyporcalciurie-hyperoxalurie). Cette relation renforce la couleur comme marqueur diagnostique.

- **Surface lisse – Couleur brun foncé (Phi = 0,610, p Chi² < 0,0001, p Fisher < 0,0001)**

L'association forte (Phi = 0.61) entre une surface lisse et une couleur brun foncé indique que les calculs lisses sont souvent de couleur brun foncé, probablement liés à des calculs d'oxalate monohydraté, connus pour leur surface polie et leur teinte sombre, caractérisé par une cristallisation homogène. Cette relation suggère que la texture lisse pourrait refléter une cristallisation lente et uniforme, typique des environnements urinaires sursaturés en oxalate.

- **Surface rugueuse – Aspect (Phi = 0,415, p Chi² < 0,0001, p Fisher < 0,0001)**

Cette association forte indique que les calculs rugueux présentent un aspect morphologique distinct, probablement complexe, en raison de dépôts cristallins variés.

- **Surface brillance – Couleur jaune clair (Phi = 0,879, p Chi² < 0,0001, p Fisher < 0,0001)**

Cette association exceptionnellement forte indique que les calculs brillants et jaune clair correspondent à l'oxalate de calcium dihydraté, caractérisé par une surface polie et une couleur claire. Ce résultat est un marqueur diagnostique visuel puissant.

Ces résultats renforcent la pertinence de l'analyse morphologique comme outil diagnostique. Les associations retrouvées entre certains traits visuels et les données cliniques (sexe, infection, anomalie métabolique, récidive) suggèrent que la morphologie externe des lithiases reflète en partie leur étiologie sous-jacente.

L'analyse des coefficients de Phi montre des forces d'association modérées à fortes pour certaines relations (jusqu'à $\varphi = 0,47$), ce qui indique une pertinence discriminante intéressante. Par exemple, les caractères rugueux, crayeux, ou encore brun foncé, associés à des antécédents, des infections ou des anomalies métaboliques, pourraient constituer des marqueurs morphologiques d'orientation.

Ces résultats seront complétés par l'analyse des variables qualitatives nominales, qui explorera des caractéristiques plus diversifiées, telles que les variations de couleur et de texture, pour approfondir la compréhension des mécanismes lithogéniques.

4.1.2 Comparaisons par paires des variables qualitatives nominales.

Les comparaisons par paires de variables qualitatives nominales ont été réalisées à l'aide du test du Chi², avec un seuil de significativité corrigé par Bonferroni ($p < 0,05$). La force des associations a été quantifiée par le coefficient V de Cramér.

Au total, 596 associations significatives ont été identifiées, réparties en trois classes selon la force des associations : modérée (78 associations), forte (223 associations), et très forte (295 associations), Chaque classe est présentée avec un tableau des associations les plus pertinentes par catégorie, des représentations graphiques (heatmap et diagramme de barres). La liste complète des comparaisons étant disponible en annexe 9.

4.1.2.a Associations modérées (V de Cramér : 0,2–0,4)

Les associations modérées reflètent des relations significatives mais d'intensité intermédiaire, impliquant des facteurs cliniques (localisation, régime alimentaire) et morphologiques (couleur, texture, structure). Ces associations suggèrent des influences subtiles du métabolisme

lithogénique, modulées les habitudes alimentaires qui pourraient conditionner indirectement la localisation et la morphologie des calculs, ainsi que des corrélations entre types d'aliments, pouvant refléter des profils alimentaires distincts (ex. occidental vs traditionnel).

Le tableau suivant présente six associations représentatives.

Tableau 29 : Associations modérées entre les variables qualitatives nominales

Variable 1	Variable 2	p value	V de Cramér
Localisation – rein	Régime alimentaire - légumineuses	<0,001	0,3892
Localisation – vessie	Couleur couche interne - blanche à crème	<0,001	0,3841
Régime alimentaire – légumineuses	Couleur couche interne - brun foncé	<0,001	0,3892
Régime alimentaire – lait	Structure couche interne - concentrique	<0,001	0,3781
Régime alimentaire - sucreries	Couleur couche interne - orange	<0,001	0,3698
Régime alimentaire – lait	Régime alimentaire - sucreries	0,0024	0,3200
Régime alimentaire – légumineuses	Régime alimentaire - thé vert	<0,001	0,3100
Zone de surface 2 – mamelonné	Texture couche interne - compacte	<0,001	0,3781

Pour chaque paire de variables, une p-value inférieure à 0.05 est considérée comme une association statistiquement significative.

Figure 122 (Heatmap) : Présente les coefficients V de Cramér pour les associations modérées, organisés par catégorie (clinique : localisation, régime alimentaire ; morphologique : couleur, texture, structure). Une échelle de couleurs (bleu clair pour V ≈ 0,2, bleu foncé pour V ≈ 0,4

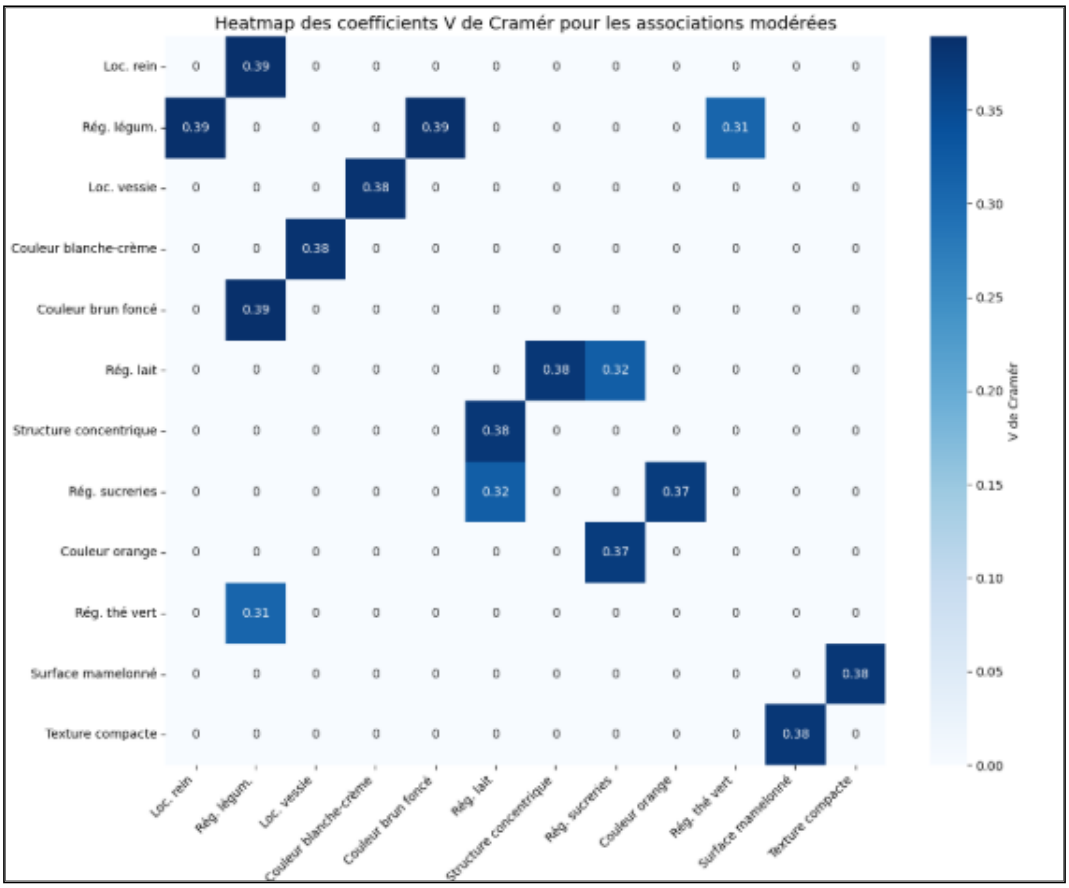


Figure 96 : Heatmap des coefficients V de Cramér pour les associations modérées

Les zones foncées sur la carte de chaleur confirment des relations modérées entre certaines variables. Ces associations, bien que statistiquement significatives, restent limitées en intensité

- **Influence du régime alimentaire sur la localisation du calcul**

- **Localisation - rein et Régime alimentaire - légumineuses : Cette association modérée (V = 0,3892 ; p < 0,001) :**

Indique que la consommation de légumineuses est significativement liée à la localisation des calculs dans le rein. Daudon et al. (2018) notent que les légumineuses, riches en oxalates, augmentent la concentration urinaire d'oxalate, favorisant la formation de calculs rénaux, probablement des oxalates de calcium. Cette relation suggère que le régime influence le site de précipitation cristalline, possiblement via des modifications du microenvironnement rénal.

- **Localisation - vessie et Couleur couche interne - blanche à crème : L'association (V = 0,3841; p<0.001)**

Montre que les calculs vésicaux sont souvent de couleur blanche à crème dans la couche interne, une caractéristique morphologique associée à des calculs phosphatés (ex. carbapatite) selon Daudon et al. (2018). Cette couleur pourrait refléter un pH urinaire alcalin, fréquent dans les infections vésicales, favorisant la précipitation de phosphates. Cette relation modérée souligne l'importance de la morphologie comme traceur indirect du métabolisme lithogénique.

- **Corrélations entre les types d'aliments et la morphologie**

- **Régime alimentaire - légumineuses et Couleur couche interne - brun foncé (V = 0,3892; p<0.001)**

Cette association (V = 0,3892) indique que les légumineuses riches en oxalates, sont liées à une couleur brun foncé de la couche interne, probablement due à des dépôts d'oxalate de calcium monohydraté, comme décrit par Daudon et al. (2018) a montré que les oxalates alimentaires augmentent le risque lithiasique, ce qui corrobore cette observation. Cette relation suggère que le régime module la composition chimique des calculs, justifiant son inclusion dans les modèles prédictifs de diagnostic. Avec des implications pour la prévention via une modulation du régime alimentaire.

- **Régime alimentaire - lait vs Structure couche interne - concentrique : L'association (V = 0,3781; p<0.001)**

Montre que la faible consommation de lait est liée à une structure concentrique de la couche interne, typique des calculs de carbapatite ou d'oxalate de calcium monohydraté, selon Daudon et al. (2018). Ce résultat pourrait s'expliquer par une carence calcique alimentaire favorisant une hyperabsorption intestinale de l'oxalate, conduisant à une cristallisation interne organisée. Cette relation modérée souligne l'importance du régime alimentaire, notamment de l'apport calcique, dans la prévention des récidives lithiasiques.

- **Régime alimentaire - sucreries vs Couleur couche interne - orange : Cette association (V = 0,3698; p<0.001)**

Indique que les sucreries sont associées à une couleur orange de la couche interne, potentiellement liée à des dépôts d'acide urique, comme suggéré dans les discussions. Robertson et al. (1986) ont lié les sucres simples à une acidification urinaire, favorisant les

calculs uratiques. Cette relation modérée suggère une voie lithogénique distincte, nécessitant une analyse biochimique pour confirmer la composition.

- **Corrélations entre variables alimentaires**

- **Régime alimentaire - lait vs Régime alimentaire - sucreries : L'association (V = 0,3200; p = 0,0024)**

Reflète une corrélation modérée entre la consommation de lait et de sucreries, correspondant à un profil alimentaire occidental, Daudon et al. (2018) soulignent que ce profil, riche en calcium et sucres, augmente le risque lithiasique via l'hypercalciurie et l'acidification urinaire. Cette relation justifie une analyse des habitudes alimentaires dans la prise en charge des patients.

- **Régime alimentaire - légumineuses vs Régime alimentaire - thé vert : Cette association (V = 0,3100; p<0.001)**

Indique une relation modérée entre légumineuses et thé vert, reflétant un profil alimentaire traditionnel. Robertson et al. (1986) notent que les polyphénols du thé vert et les oxalates des légumineuses peuvent influencer la lithogenèse via des mécanismes métaboliques complexes. Cette relation modérée souligne la nécessité d'une approche multifactorielle pour comprendre les interactions alimentaires.

- **Corrélations entre les caractères morphologiques :**

- **Surface zone 2 - mamelonné vs Texture couche interne - compacte : Cette association (V = 0,3781; p<0.001) :**

Montre que les calculs à surface mamelonnée dans la zone 2 ont souvent une texture compacte dans la couche interne. Daudon et al. (2018) associent les surfaces mamelonnées à des calculs d'oxalate de calcium monohydraté, dont la compacité reflète une cristallisation dense. Cette relation modérée indique une cohérence morphologique, pertinente pour la classification des calculs et leur analyse diagnostique.

Les associations modérées mettent en évidence des influences subtiles du régime alimentaire sur la localisation et la morphologie des calculs, ainsi que des corrélations entre types d'aliments, reflétant des profils alimentaires distincts. Les associations fortes, présentées ultérieurement, révéleront des relations plus robustes, impliquant des mécanismes lithogéniques plus marqués.

4.1.2.b Associations fortes (V de Cramér : 0,4–0,6)

Les associations fortes, caractérisées par des coefficients V de Cramér comprennent entre 0,4 et 0,6, indiquent des relations robustes entre les variables cliniques (régime alimentaire) et morphologiques (surface, texture, structure, couleur) des calculs urinaires. Ces associations, identifiées parmi les 78 relations significatives, entraînent des mécanismes lithogéniques marqués, influencés par des facteurs métaboliques et environnementaux.

Le Tableau 37 présente une sélection des associations fortes les plus pertinentes par catégorie

Tableau 30 . Associations fortes entre les variables qualitatives nominales

Variable 1	Variable 2	valeur p	V de Cramér
Régime alimentaire – viandes	Porosité couche interne	<0,001	0,4450
Surface Dureté zone 1	Dureté texture couche interne	<0,001	0,5483
Surface couche interne - rugueuse	Noyau de surface rugueux	<0,001	0,5560
Surface couche interne – lisse	Texture noyau – dureté	<0,001	0,4802
Surface couche interne - crayeuse	Texture noyau – dureté	<0,001	0,5522
Texture couche interne - duretés	Texture noyau – dureté	<0,001	0,5563
Surface couche interne - rugueuse	Structure noyau - microcristallin	<0,001	0,4995
Texture couche interne - compacte	Texture noyau – compacte	<0,001	0,5229

Toutes les valeurs p sont inférieures à 0,001, confirmant une significativité statistique élevée.

La heatmap (fig 123) illustre les relations fortes entre les variables cliniques et morphologiques, avec une échelle de couleurs (vert clair à vert foncé) pour les V de Cramér de 0,4 à 0,6.

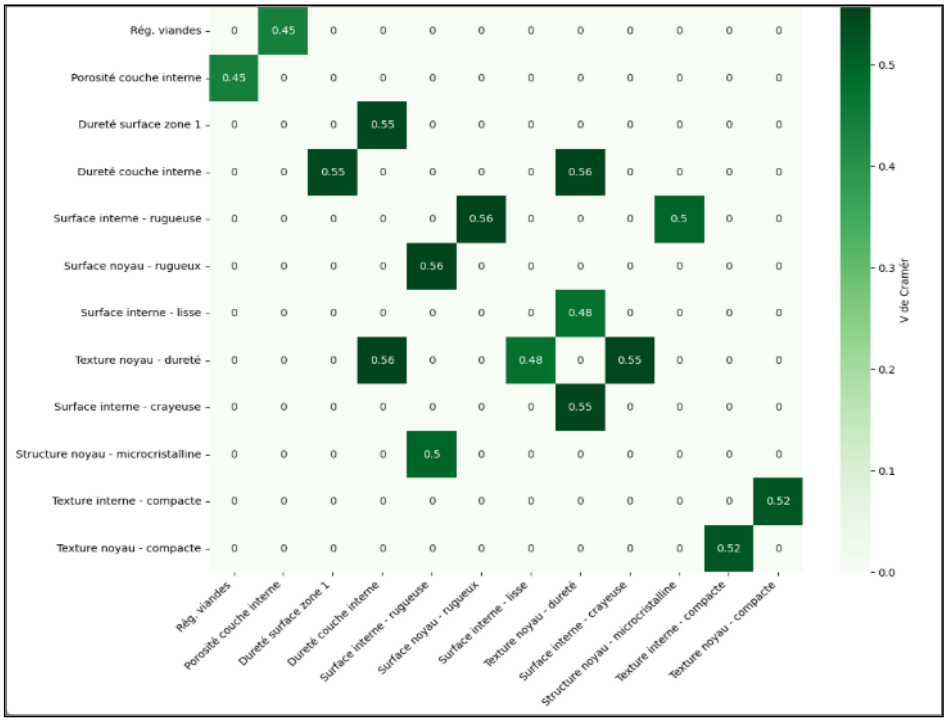


Figure 97 : Heatmap des coefficients V de Cramér pour les associations fortes

Les teintes plus foncées observées dans cette section de la heatmap correspondent aux associations fortes, suggérant une co-occurrence fréquente de certaines variables

- **Corrélations entre les types d'aliments et la morphologie**

- **Régime alimentaire - viandes vs Porosité couche interne (Chi² = 60,5960, V = 0,4450)**

Une consommation élevée de viande est fortement associée à une porosité marquée de la couche interne, caractéristique des calculs d'acide urique dihydraté.

La porosité reflète une formation dans des urines acides, souvent liée à un régime riche en protéines animales, comme décrit par Robertson et al. (1986). Ces auteurs indiquent que les protéines augmentent l'excrétion d'acide urique et abaissent le pH urinaire, favorisant les structures poreuses. Daudon et coll. (2018) associé la porosité aux calculs uratiques, fréquents chez les patients carnivores. Cette relation robuste suggère que la porosité pourrait servir de marqueur pour identifier les patients à risque de calculs uratiques, justifiant des interventions diététiques ciblées (réduction de l'apport en viande) pour prévenir les récidives lithiasiques.

- **Corrélations entre les caractères morphologiques**

- **Dureté surface zone 1 et Dureté texture couche interne (Chi² = 63,1354, V = 0,5483) :**

Une surface externe dure est fortement corrélée à une texture dure dans la couche interne, indiquant une cohérence mécanique des calculs. Cette association reflète une homogénéité structurale, typique des calculs d'oxalate de calcium monohydraté, connus pour leurs dureté élevées (Daudon et al., 2018). Cette observation est cohérente avec les travaux de Daudon et al. (2018), qui associent la dureté à des calculs résistants à la fragmentation. Cette relation met en évidence l'importance des caractéristiques morpho-mécaniques pour orienter le traitement, notamment en cas de lithotritie, où les calculs durs nécessitent des approches spécifiques.

- **Surface couche interne - rugueuse vs Surface noyau - rugueux (Chi² = 64,9180, V = 0,5560) :**

Une surface rugueuse de la couche interne est fortement associée à une surface rugueuse du noyau, suggérant une continuité morphologique. Cette forte corrélation indique une formation cohérente des calculs, où des conditions urinaires similaires (ex. pH acide, forte concentration d'oxalate) établissant une rugosité persistante du noyau à la couche interne. Daudon et coll. (2018) associent la rugosité aux calculs d'oxalate de calcium dihydraté, observés dans des urines hypersaturées. Cette relation est cruciale, car elle positionne la rugosité comme un marqueur diagnostique fiable, facilitant l'identification de la composition chimique.

- **Surface couche interne - lisse vs Texture noyau - dureté (Chi² = 48,4336, V = 0,4802) :**

Une surface lisse de la couche interne est fortement liée à un noyau dur, caractéristique des calculs à croissance lente et stable. La surface lisse est typique des calculs d'oxalate de calcium monohydraté, qui présentent une texture dense et dure, comme rapporté par Daudon et al. (2018). La dureté du noyau reflète une structure résistante, formée dans des conditions urinaires stables. Cette association contraste avec les relations impliquant la rugosité, suggérant des mécanismes lithogéniques distincts. Cette relation souligne l'importance de l'analyse de la texture du noyau pour prédire la composition chimique et orienter les stratégies thérapeutiques, notamment pour les calculs résistants.

- **Texture couche interne - dureté vs Texture noyau - dureté (Chi² = 97,4683, V = 0,5563) :**

La dureté de la couche interne est très fortement associée aux duretés du noyau, reflétant une homogénéité mécanique exceptionnelle. Avec le Chi² le plus élevé (97,4683), cette association indique une cohérence structurale remarquable, caractéristique des calculs d'oxalate de calcium monohydraté, connus pour leur résistance mécanique (Daudon et al., 2018). Cette relation est un atout, validant les duretés comme marqueur diagnostique fiable, particulièrement pour les calculs nécessitant des interventions spécifiques (ex. lithotritie extracorporelle). Elle renforce l'importance de l'analyse morphologique pour prédire la composition chimique.

- **Surface couche interne - rugueuse vs Structure noyau - microcristalline (Chi² = 52,4029, V = 0,4995) :**

Une surface rugueuse de la couche interne est fortement liée à une structure microcristalline du noyau, suggérant une organisation fine des cristaux. La structure microcristalline, souvent observée dans les calculs d'oxalate de calcium ou d'acide urique, est compatible avec une surface rugueuse, résultat d'une croissance cristalline irrégulière (Daudon et al., 2018). Cette association indique une dynamique de formation où le noyau microcristallin sert de base à une couche interne hétérogène. Cette relation est significative, car elle met en évidence la complémentarité des analyses de surface et de structure pour comprendre les mécanismes lithogéniques et orienter les analyses biochimiques.

- **Texture couche interne - compacte vs Texture noyau - compact (Chi² = 57,4282, V = 0,5229) :**

Une texture compacte de la couche interne est fortement corrélée à un noyau compact, limitant une densité élevée à travers le calcul. La compacité homogène est typique des calculs d'oxalate de calcium dihydraté ou monohydraté, formés dans des conditions urinaires stables avec une forte concentration d'oxalate (Daudon et al., 2018). Cette association suggère une croissance cristalline cohérente, sans porosité ou lacunes. Cette relation valide l'utilisation de la compacité comme indicateur de calculs oxaliques, facilitant le diagnostic et la planification des traitements, notamment pour les calculs résistants à la fragmentation.

Par rapport à la classe modérée, ces relations montrent une robustesse accrue, reflétant des mécanismes lithogéniques bien définis, des influences par le pH urinaire, la composition chimique, et les facteurs métaboliques. Les références à Daudon et al. (2018) et Robertson et al. (1986) confirment que les régimes riches en protéines animales favorisent des morphologies

poreuses et dures d'acide urique anhydre et dihyraté, tandis que la rugosité, la compacité et les duretés sont des marqueurs fiables pour les calculs oxaliques. Ces résultats ont des implications directes pour le diagnostic et la prise en charge de la lithiase urinaire, en soulignant l'importance de l'analyse morphologique combinée à l'évaluation des habitudes alimentaires.

Ces associations fortes valident l'hypothèse que la morphologie des calculs reflète les conditions métaboliques sous-jacentes, ce qui renforce l'intérêt de l'analyse morphologique dans l'évaluation clinique des patients lithiasiques.

4.1.2.c Associations très fortes (Cramér's V > 0,6)

Les associations très fortes, caractérisées par des coefficients V de Cramér supérieurs à 0,6, représentent les relations les plus robustes entre les caractéristiques morphologiques des calculs urinaires, notamment au niveau de la surface externe (zone 2), de la couche interne, et du noyau. Ces relations traduisent des mécanismes lithogéniques très spécifiques, reflétant des conditions métaboliques et urinaires stables.

Le Tableau suivant présente une sélection de 8 associations très fortes

Tableau 31 . Les associations très fortes entre les variables qualitatives nominales

Variable 1	Variable 2	valeur p	V de Cramér
Zone de surface 2 – mamelonnée	Couleur zone 2 - brun jaune foncé	<0,001	0,7660
Surface couche interne - crayeuse	Texture couche interne - duretés	<0,001	0,8707
Surface couche interne – crayeuse	Porosité couche interne	<0,001	0,8501
Porosité couche interne	Structure couche interne - lacunaire	<0,001	0,9310
Stratification couche interne	Structure couche interne - couches concentriques fines	<0,001	0,7337
Structure couche interne - couches concentriques fines	Couleur couche interne - grège	<0,001	0,7327
Structure couche interne – concentrique	Couleur couche interne - brun foncé	<0,001	0,8168
Surface couche interne – lisse	Structure couche interne - couches concentriques fines	<0,001	0,7110

Toutes les valeurs p sont inférieures à 0,001, confirmant une significativité statistique élevée.

La heatmap ci-dessous illustre les relations très fortes, avec une échelle de couleurs (rouge clair à rouge foncé) pour les V de Cramér > 0,6.

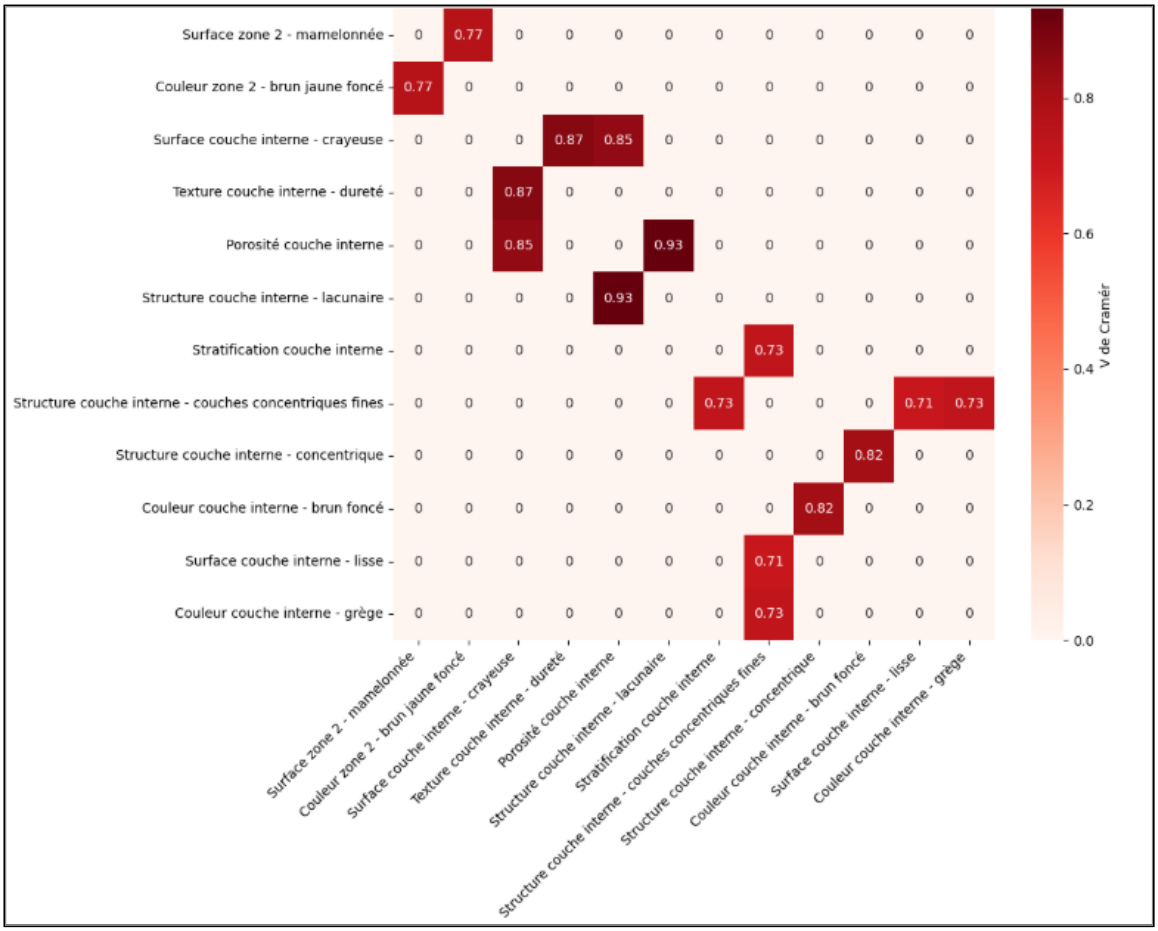


Figure 98 : Heatmap des coefficients V de Cramér pour les associations très fortes

Les zones les plus sombres de la heatmap mettent en évidence des couples de variables dont l'association est presque systématique dans les échantillons analysés.

- **Surface zone 2 - mamelonnée et Couleur zone 2 - brun jaune foncé (Chi² = 123,2292, V = 0,7660) :**

Une surface mamelonnée est très fortement associée à une couleur brun jaune foncé, indiquant une signature visuelle distinctive. La surface mamelonnée, caractérisée par des protubérances arrondies, est typique des calculs d'oxalate de calcium dihydraté généralement en phase de conversion cristalline, formés dans des urines hypersaturées en oxalate et calcium (Daudon et al., 2018). Cette relation positionne la couleur et la morphologie externe comme des marqueurs diagnostiques non invasifs, pour orienter l'analyse chimique.

- **Surface couche interne - crayeuse et Texture couche interne - duretés (Chi^2 = 159,1966, V = 0,8707) :**

La surface crayeuse de la couche interne est très fortement associée à une texture friable, une configuration typique des calculs phosphatiques, notamment ceux à base de carbapatite et struvite. Ces derniers se forment en milieu urinaire alcalin, souvent dans un contexte infectieux. Cette forte liaison entre une surface crayeuse et une texture friable reflète une structure peu cohésive, caractéristique des lithiases phosphatiques, et illustre l'intérêt de l'analyse stratigraphique dans l'interprétation du processus de cristallisation.

- **Surface couche interne - crayeuse vs Porosité couche interne (Chi^2 = 151,7680, V = 0,8501) :**

Une surface crayeuse est très fortement associée à une porosité élevée dans la couche interne, indiquant une structure interne friable. Les calculs de phosphate de calcium, associés à une surface crayeuse, présentent souvent une porosité marquée due à une précipitation rapide dans des urines alcalines (Daudon et al., 2018). Cette forte corrélation suggère une dynamique de formation où la porosité facilite l'incorporation de microcavités. Robertson et coll. (1986) dépendent des structures poreuses aux lithiases infectieuses. Cette association valide la porosité comme un indicateur diagnostique pour les calculs phosphatiques, avec des implications pour la prise en charge des infections urinaires.

- **Porosité couche interne vs Structure couche interne - lacunaire (Chi^2 = 182,0268, V = 0,9310) :**

Une porosité élevée est très fortement corrélée à une structure lacunaire, caractérisée par des cavités internes importantes. La structure lacunaire, fréquente dans les calculs uratiques ou phosphatiques, reflète une formation dans des conditions urinaires instables, avec des variations de pH ou de concentration (Daudon et al., 2018). Cette relation exceptionnellement robuste (V = 0,9310) indique une interdépendance entre porosité et lacunes, suggérant une croissance cristalline désordonnée. Robertson et coll. (1986) associent les structures lacunaires à des calculs uratiques formés dans des urines acides. Cette association renforce l'hypothèse que la morphologie interne reflète les conditions métaboliques, offrant des marqueurs pour le diagnostic et la prévention.

- **Stratification couche interne vs Structure couche interne - couches concentriques fines (Chi² = 113,0511, V = 0,7337) :**

Une stratification marquée de la couche interne est très fortement associée à une structure à couches concentriques fines, indiquant une organisation stratifiée précise. Les couches concentriques fines, typiques des calculs d'oxalate de calcium monohydraté, entraînent une croissance séquentielle dans des conditions urinaires stables (Daudon et al., 2018). Cette relation suggère une formation progressive, où chaque couche correspond à des épisodes de cristallisation homogènes. Robertson et coll. (1986) notent que la stratification est influencée par des variations périodiques du pH urinaire. Cette association valide la stratification comme un marqueur diagnostique pour les calculs oxaliques, avec des implications pour l'analyse de la dynamique lithogénique.

- **Structure couche interne - couches concentriques fines vs Couleur couche interne - grège (Chi² = 112,7509, V = 0,7327) :**

Une structure à couches concentriques fines est très fortement associée à une couleur grège, suggérant une signature visuelle spécifique. La couleur grège, souvent observée dans les calculs d'oxalate de calcium de sous type Id, est liée à des dépôts de pigments urinaires dans des conditions de cristallisation stable (Daudon et al., 2018). Cette relation indique que les couches concentriques fines, formées dans des urines hypersaturées, incorporent des pigments homogènes. Robertson et coll. (1986) associent les couleurs grèges aux calculs oxaliques. Cette association est pertinente, car elle positionne la couleur grège comme un indicateur non invasif de la composition chimique, facilitant le diagnostic préliminaire.

Structure couche interne - concentrique vs Couleur couche interne - brun foncé (Chi² = 140,0936, V = 0,8168) :

Une structure concentrique est très fortement corrélée à une couleur brun foncé, reflétant une cohérence morphologique et visuelle. Les structures concentriques, fréquentes dans les calculs d'oxalate de calcium monohydraté, sont associées à une croissance stratifiée dans des urines hypersaturées (Daudon et al., 2018). La couleur brun foncé, liée à des pigments urinaires concentrés, renforce cette association, suggérant des conditions urinaires riches en oxalate. Robertson et coll. (1986) notent que les couleurs foncées sont typiques des calculs oxaliques durs. Cette relation valide la couleur brun foncé comme un marqueur diagnostique pour les

calculs oxaliques, avec des implications pour la lithotritie, où ces calculs doivent nécessairement des énergies élevées.

- **Surface couche interne - lisse vs Structure couche interne - couches concentriques fines (Chi^2 = 106,1669, V = 0,7110)**

Une surface lisse de la couche interne est très fortement associée à une structure à couches concentriques fines, indiquant une morphologie interne homogène. Une surface lisse, typique des calculs d'oxalate de calcium monohydraté de sous type Id, est souvent associée à une croissance cristalline régulière, formant des couches concentriques fines (Daudon et al., 2018). Cette relation suggère une formation dans des conditions urinaires stables, avec un pH constant. Robertson et coll. (1986) s'appuient sur les surfaces lisses aux calculs monohydratés. Cette association positionne la surface lisse et la structure concentrique comme des marqueurs diagnostiques fiables, détectables par analyse morphologique, pour les calculs oxaliques.

Comparées aux classes Modérées et fortes, ces relations traduisent des mécanismes lithogéniques spécifiques, liées à des conditions urinaires stables (pH, concentration de solutés). Les références à Daudon et al. (2018) et Robertson et al. (1986) confirment que les morphologies mamelonnées, crayeuses, poreuses, lacunaires, et concentriques sont des signatures des calculs oxaliques, uratiques, et phosphatiques, influencées par des facteurs métaboliques comme le pH urinaire. Ces résultats ont des implications majeures pour le diagnostic (ex. identification non invasive via imagerie), la prise en charge thérapeutique (ex. lithotritie adaptée aux calculs durs ou poreux), et la prévention (ex. ajustements métaboliques).

Ces associations renforcent l'hypothèse que la morphologie des calculs reflète précisément les conditions métaboliques, offrant des bases solides pour des modèles prédictifs et des stratégies personnalisées.

4.1.3 Comparaisons par paires des variables quantitatives

L’analyse des variables quantitatives, telles que les concentrations urinaires et sanguines de métabolites, le pH urinaire, ou la diurèse, permet d’identifier les relations entre ces facteurs et de mieux comprendre les mécanismes de formation des calculs. Ces relations sont essentielles pour le diagnostic, la prédiction du type de calcul (oxalate de calcium, acide urique, phosphate), et l’optimisation des stratégies thérapeutiques.

Cette section porte sur les corrélations linéaires et les modèles de régression reliant les paramètres biologiques sanguins et urinaires aux caractéristiques cliniques des patients, en focalisant sur les associations significatives.

Le tableau (annexe 10) contient 72 comparaisons par paires significatives ($p < 0,05$), avec des coefficients de corrélation allant de -0,555 à +0,864. Les corrélations positives dominent (58/72), indiquant des relations où l'augmentation d'une variable est associée à l'augmentation de l'autre. Les corrélations négatives (14/72) reflètent des relations inverses, souvent impliquant le pH urinaire ou les phosphates urinaires. Les associations les plus fortes ($\rho > 0,6$) concernent les relations entre les paramètres sanguins et urinaires d'un même métabolite (glucose, magnésium, phosphate).

Le Tableau 39 présente une sélection de 10 paires de variables, incluant des corrélations les plus fortes positives et négatives ($|r| > 0,23$), choisies pour leur pertinence biologique et leur significativité. Les résultats sont illustrés par une heatmap des corrélations, des boîtes à moustaches pour les distributions, et des nuages de points individuels avec courbe de régression

Tableau 32 . Principales corrélations linéaires par paires des variables quantitatives

Variable 1	Variable 2	R	p value (corrélation)	B	p-value (Régression)
PO4 UR (mg/24h)	Ph	0,6039	9,67E-09	0,0010	9,67E-09
Ca Sg (mg/l)	PTH (pg/ml)	0,5771	2,13E-09	0,4822	2,13E-09
IMC	pH	-0,5551	5,04E-06	-0,0838	5,04E-06
PO4 UR (mg/24h)	Na^+ UR (mEq/l)	-0,4721	2,84E-05	-0,0681	2,84E-05
PO4 UR (mg/24h)	Gly Sg (g/l)	-0,4014	9,68E-05	-373,6357	9,68E-05
Diurèse (l)	pH	0,4604	9,29E-06	0,9389	9,29E-06
Âge	Ac urique Sg (mg/l)	0,3710	0,0002	0,4571	0,0002
IMC	Gly Sg (g/l)	0,3555	0,0029	0,0305	0,0029
Ac urique UR (mg/24h)	Na^+ UR (mEq/l)	0,3139	0,0185	0,2112	0,0185
Gly Sg (g/l)	pH	-0,2386	0,0279	-0,4084	0,0279

Les valeurs p confirment la significativité des corrélations et régressions.

❖ **Distribution des variables**

Les Figure 125-127 présente des boîtes à moustaches pour quatre variables clés : glycémie sanguine (Sg), phosphore urinaire (UR), pH urinaire, et IMC. Ces variables ont été sélectionnées pour leur fréquence dans les corrélations significatives et leur pertinence dans la formation des calculs rénaux.

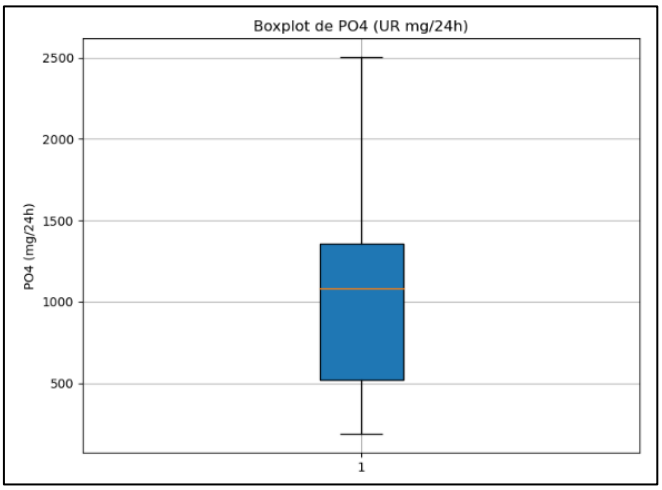


Figure 100 : Boxplot de l'excrétion urinaire de PO4 (mg/24h)

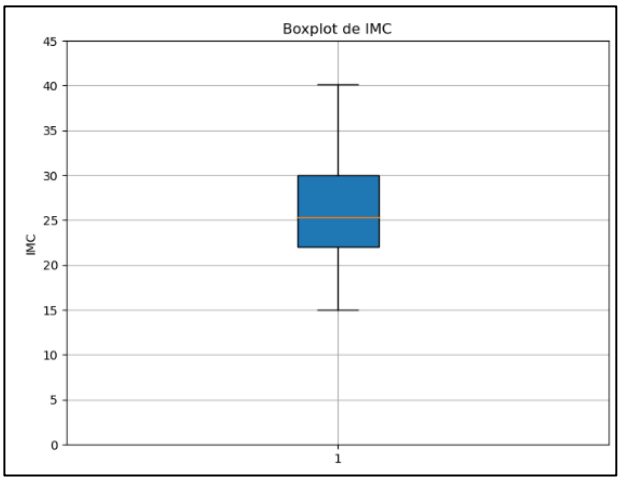


Figure 99 : Boxplot de l'Indice de Masse Corporelle (IMC)

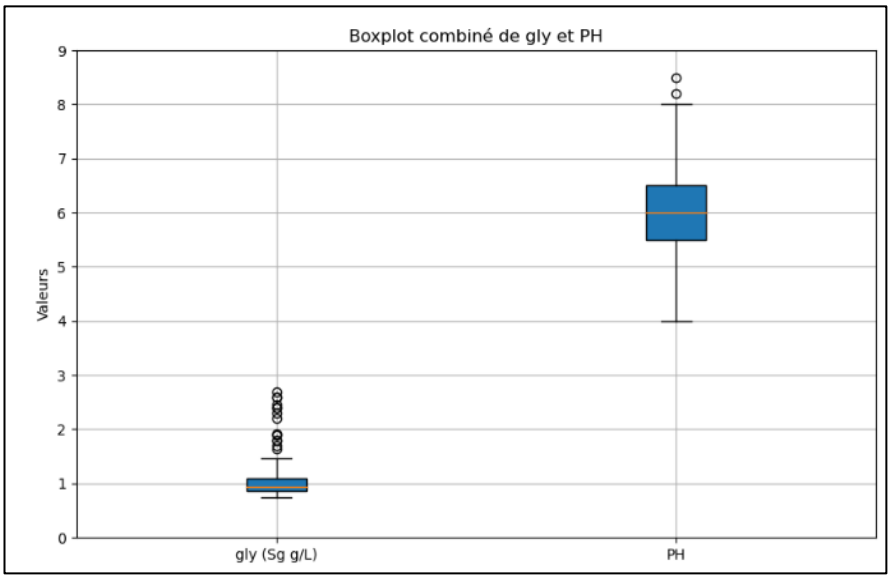


Figure 101: Boxplot combiné du pH urinaire et de la glycosurie (Sg g/L)

Les boîtes à moustaches révèlent l'étendue des valeurs des variables clés. Gly Sg et pH montrent une dispersion modérée, avec des valeurs aberrantes indiquant des cas d'hyperglycémie ou de pH extrême, influençant les modèles de régression (ex. β = -0,4084 pour Gly Sg vs pH). L'IMC, avec une variabilité plus grande, affecte significativement le pH (β = -0,0838). PO4 UR, avec une étendue de distribution, un effet notable sur pH (β = 0,0010) et Gly Sg (β = -373,6357), reflétant des interactions métaboliques complexes

La heatmap ci-dessous illustre les coefficients β pour les paires sélectionnées du Tableau 39.

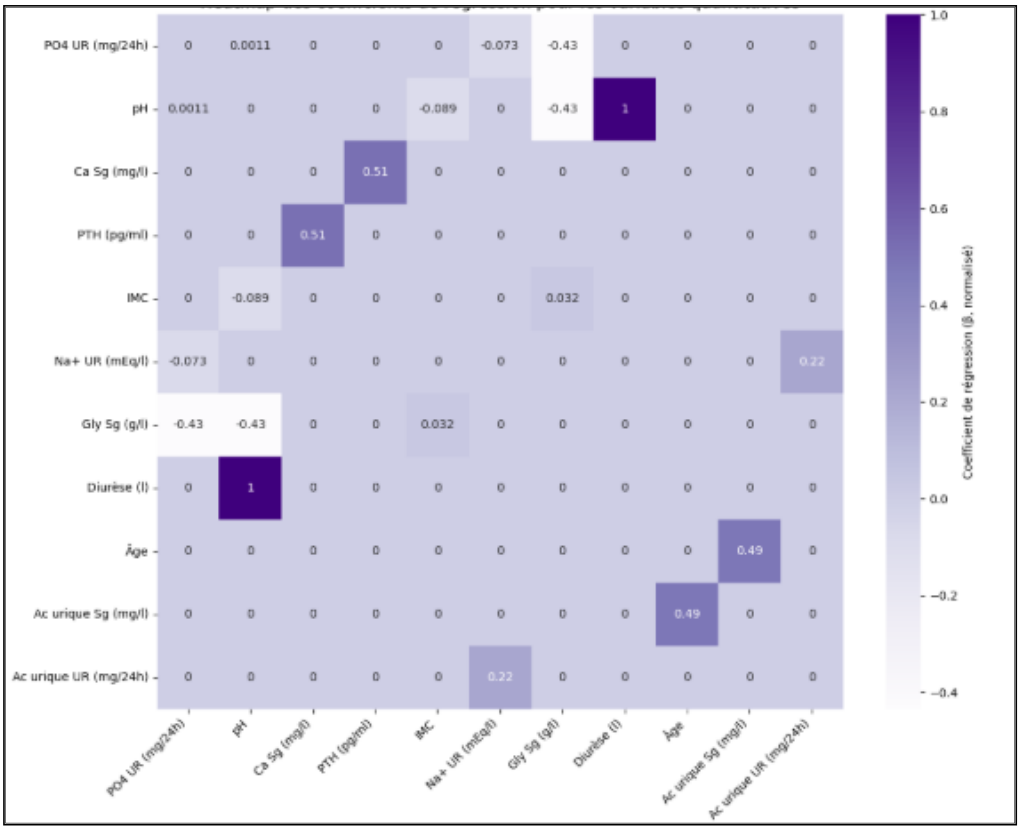


Figure 102 : Heatmap des coefficients de régression (β)

La heatmap met en évidence les coefficients β, normalisés afin d'assurer une lecture cohérente.

Les valeurs β élevées (ex. : β = 0,9389 pour Diurèse vs pH) indiquent une relation croissante entre les deux variables, tandis que les valeurs négatives (ex. : β = –0,4084 pour Gly Sg vs pH) traduisent une relation décroissante.

La corrélation linéaire (r) complète cette interprétation : par exemple, r = 0,6039 pour PO_4_UR vs pH met en évidence une association linéaire marquée, en accord avec la valeur observée du coefficient β.

Chaque paire est représentée par un nuage de points séparés avec une ligne de régression, une interprétation (figures 129-138).

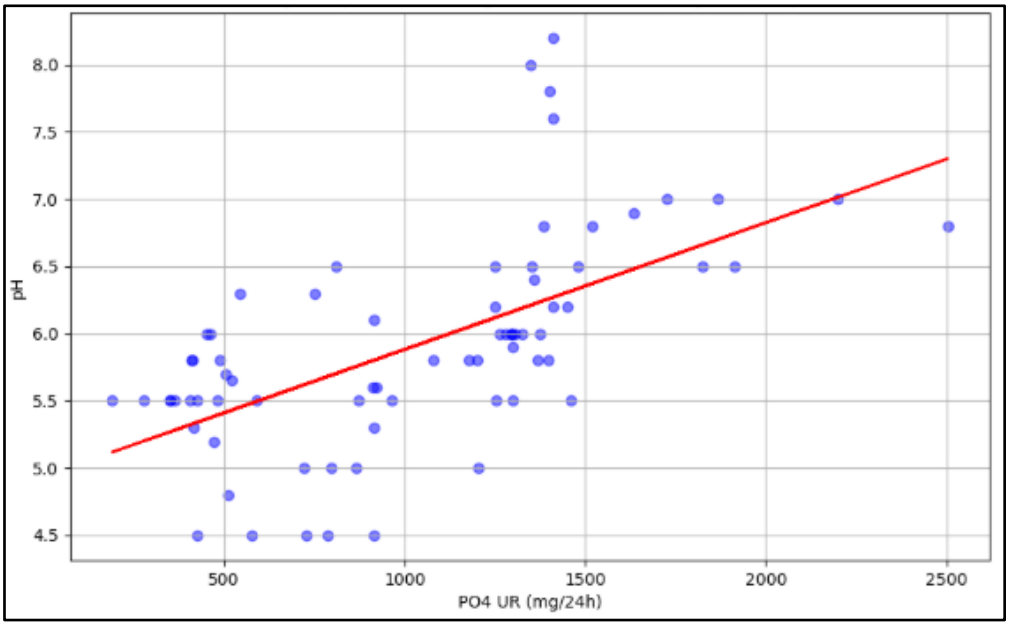


Figure 103 : Corrélation linéaire entre phosphate urinaire et pH (B= 0.0010, r = 0,6039)

Le coefficient β = 0,0010 indique qu'une augmentation de 1 mg/24h de PO4 UR augmente le pH urinaire de 0,001 unité, un effet significatif (p = 9,67E-09). La corrélation forte (r = 0,6039) confirme une relation linéaire robuste.

Ce graphique montre une tendance linéaire positive, avec une dispersion modérée, indiquant que des niveaux élevés de phosphate urinaire sont associés à un pH urinaire plus alcalin (β = 0,001). Pour chaque augmentation de 1 mg/24h de phosphate urinaire, le pH urinaire augmente de 0,001 unité. Cette relation est cohérente avec la formation de calculs de phosphate de calcium ou de struvite en milieu alcalin.

(Daudon et al., 2018). Robertson et coll. (1986) notent que l'alcalinisation urinaire favorise la précipitation du phosphate de calcium. Dans ce travail, ce β souligne l'importance du contrôle des phosphates urinaires pour prévenir les lithiases phosphatiques.

La Figure 129 souligne le rôle du pH urinaire comme marqueur diagnostique pour les calculs phosphatés.

Ces nuages de points confirment les relations linéaires attendues et fournissent des outils visuels pour orienter le diagnostic, en illustrant comment les paramètres urinaires reflètent les conditions favorisant la formation des calculs.

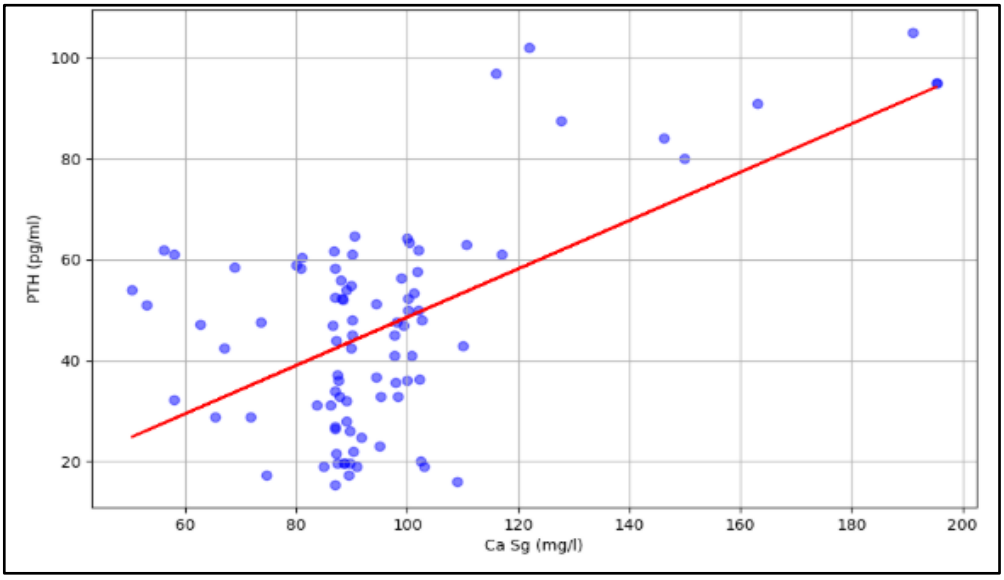


Figure 104 : Corrélation linéaire entre calcium sanguin et PTH (B= 0.4822, r = 0,5771)

Le coefficient β = 0,4822 indique qu'une augmentation de 1 mg/l de Ca Sg accroît la PTH de 0,4822 pg/ml (p = 2,13E-09). La corrélation r = 0,5771 confirme une relation linéaire forte.

Cet effet suggère une dérégulation du métabolisme calcique, liée à une hyperparathyroïdie, augmentant la calciurie et le risque de calculs calciques (Daudon et al., 2018). Robertson et coll. (1986) s'appuie sur la PTH augmentée à une résorption osseuse accumulée. Pour notre travail, ce β positionne la PTH comme un marqueur clé pour le diagnostic des lithiases calciques.

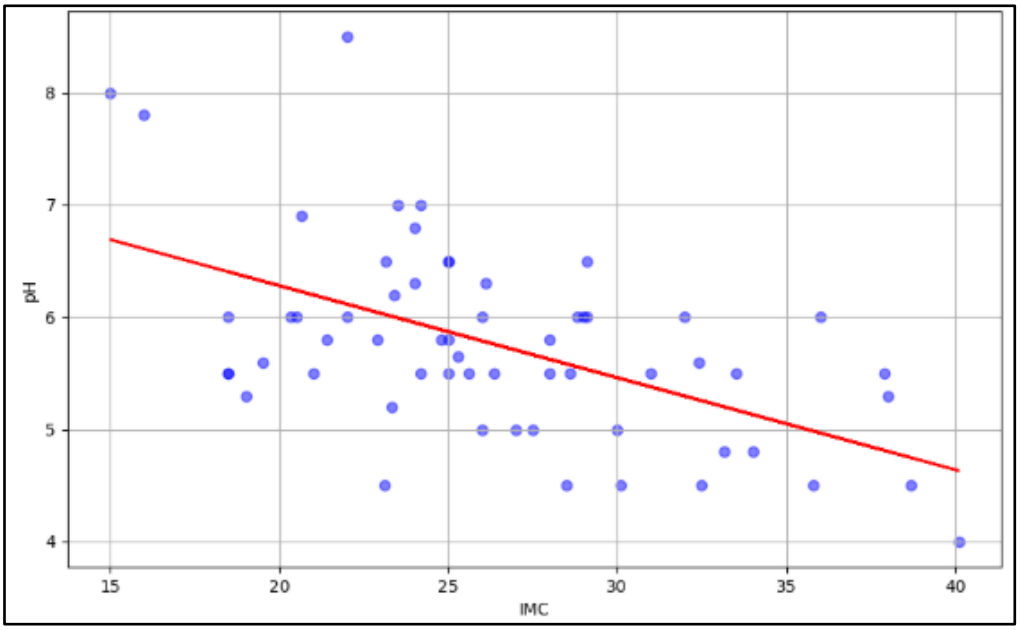


Figure 105 : Corrélation linéaire entre l'IMC et pH urinaire (B= - 0.0838 , r =- 0,555)

Le coefficient β = -0,0838 indique qu'une augmentation de 1 unité d'IMC réduit le pH urinaire de 0,0838 unité (p = 5,04E-06). La corrélation r = -0,5551 confirme une relation négative forte.

Cet effet négatif de l'IMC sur le pH favorise un environnement urinaire acide, augmentant le risque de calculs uratiques (Daudon et al., 2018). L'obésité, liée au syndrome métabolique, accroît l'excrétion d'acide urique (Robertson et al., 1986). Donc ce β suggère des interventions sur le poids pour prévenir les lithiases uratiques.

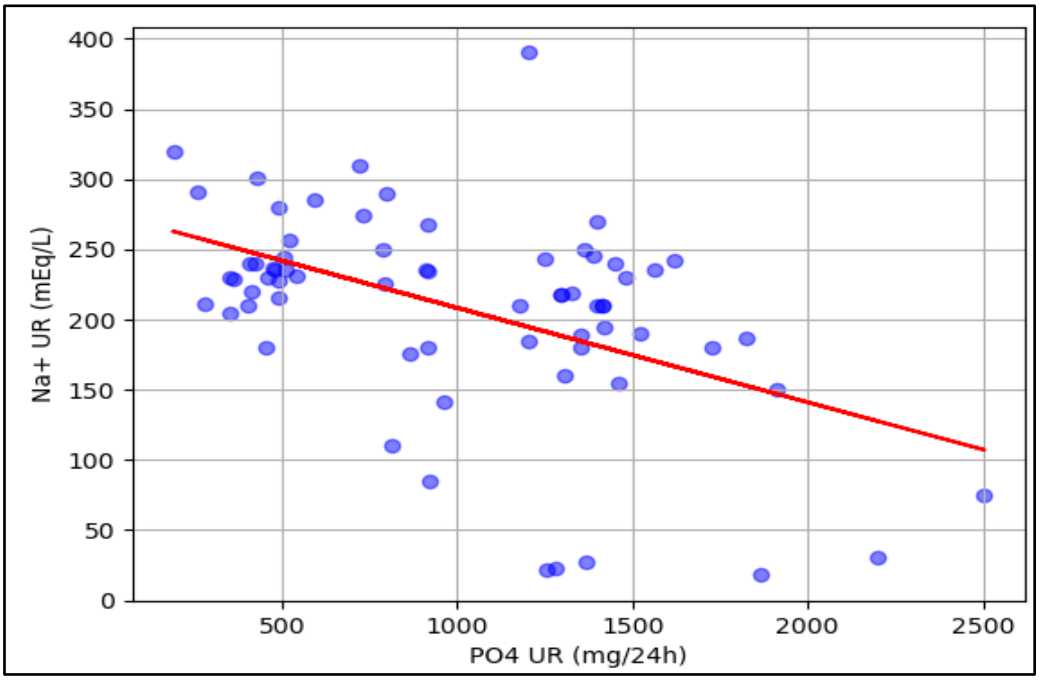


Figure 106 : Corrélation linéaire entre phosphate urinaire et Na^+ urinaire (B= -0.0681, r = -0,4721)

Le coefficient β = -0,0681 indique qu'une augmentation de 1 mg/24h de PO4 UR réduit le Na+ UR de 0,0681 mEq/l (p = 2,84E-05). La corrélation r = -0,4721 confirme une relation négative.

Le coefficient β négatif observé pourrait refléter une régulation tubulaire compétitive entre le phosphate et le sodium. En effet, une augmentation de l'excrétion urinaire de phosphate traduit généralement une diminution de sa réabsorption au niveau du tubule proximal, où il est co-transporté avec le sodium. Cette inhibition du transport phosphate/sodium s'accompagne d'une excrétion accrue de sodium, ce qui peut indirectement augmenter la calciurie, par réduction de la réabsorption tubulaire de calcium. Cette situation favorise la précipitation de sels phosphocalciques, notamment la carbapatite, surtout en cas de pH urinaire alcalin. Robertson et coll. (1986) ont montré que la natriurèse constitue un facteur favorisant la lithogenèse phosphatique, via son influence sur la calciurie. Ce coefficient β met ainsi en évidence des interactions ioniques complexes entre sodium, calcium et phosphate, qui jouent un rôle central dans les mécanismes de formation des lithiases phosphatiques (Daudon et al., 2018).

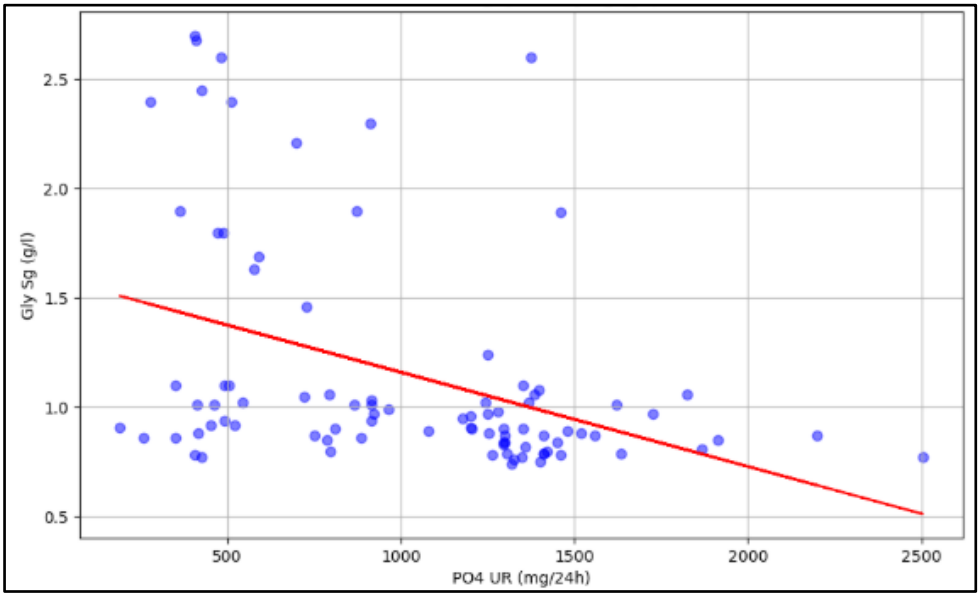


Figure 107 : Corrélation linéaire entre le phosphate urinaire et glycémie sanguine (B= -373.6357, r = 0,4014)

Le coefficient β = -373,6357 suggère un effet négatif important de PO4 UR sur Gly Sg. La corrélation r = -0,4014 indique une relation négative modérée.

Cette relation pourrait refléter une interaction métabolique où des niveaux élevés de phosphate urinaire, liés à un pH alcalin, coïncident avec une glycémie plus basse, en particulier le risque de calculs phosphocalcique (Daudon et al., 2018). Robertson et coll. (1986) notant des liens entre phosphate et métabolisme glucidique. Le coefficient β observé dans ce modèle met en évidence une piste d'investigation possible concernant les covariables métaboliques impliquées

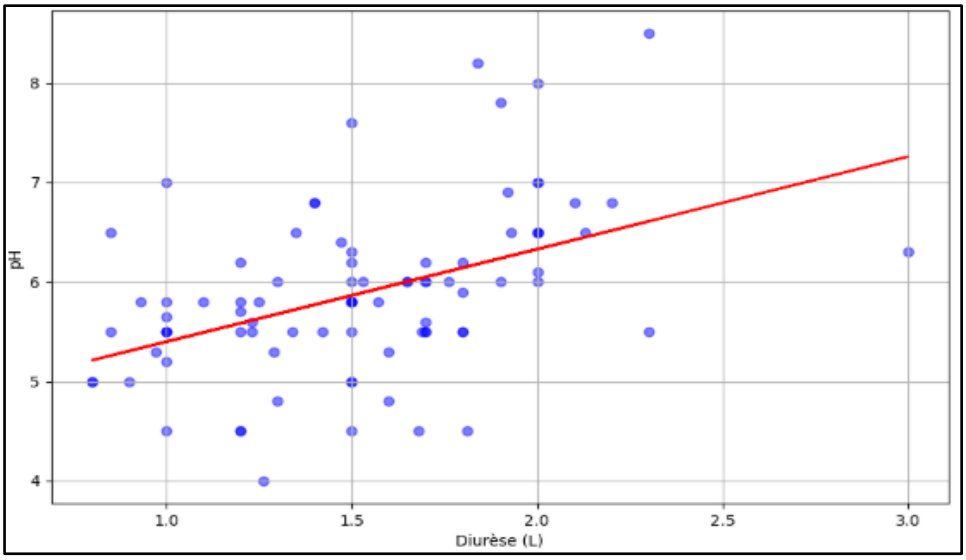


Figure 108 : Corrélation linéaire entre la diurèse et pH (B= 0,9389, r = 0,4604)

Le coefficient β = 0,9389 indique qu'une augmentation de 1 litre de diurèse augmente le pH de 0,9389 unité (p = 9,29E-06). La corrélation r = 0,4604 confirme une relation positive modérée.

Cette relation peut s'expliquer par la dilution des composés acides dans l'urine, ainsi que par des profils alimentaires ou d'hydratation favorables. Sur le plan lithogénique, une diurèse accrue pourrait moduler le type de cristaux formés en influençant le pH, notamment en réduisant le risque de calculs d'acide urique tout en augmentant potentiellement celui de phosphates calciques (Daudon et al., 2018 ; Robertson et coll., 1986). Le β souligne la diurèse comme un levier thérapeutique.

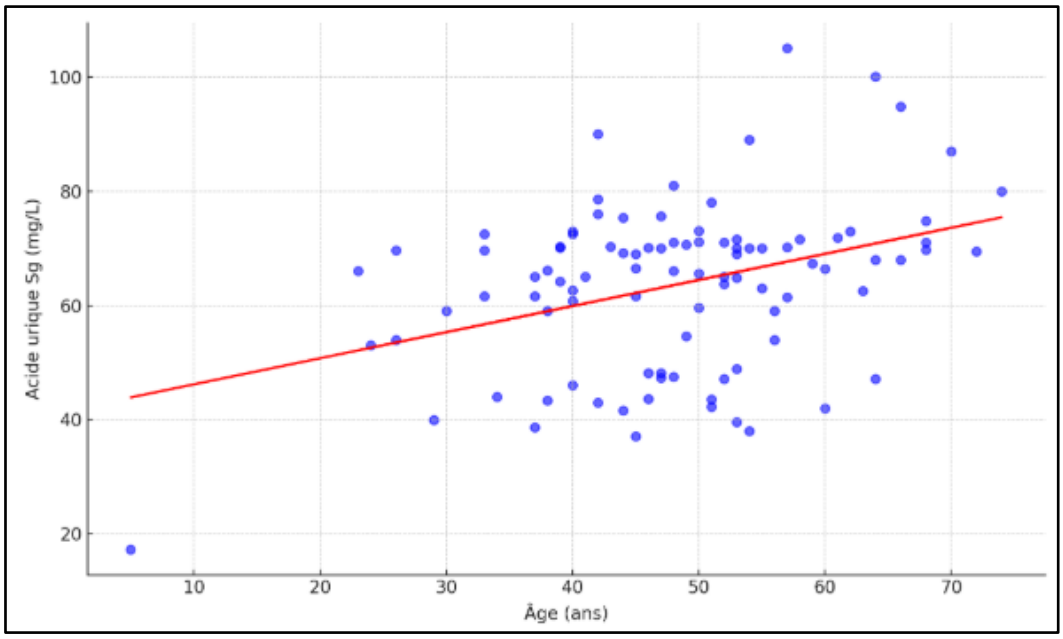


Figure 109: Corrélation linéaire entre l'âge et acide urique sanguin (β = 0,4571, r= 0,3710)

Le coefficient β = 0,4571 indique qu'une augmentation de 1 et d'âge accroît l'acide urique sanguin de 0,4571 mg/l (p = 0,0002). La corrélation r = 0,3710 confirme une relation positive modérée.

L'hyperuricémie liée à l'âge s'accompagne souvent d'une augmentation de l'excrétion urinaire d'acide urique, ce qui constitue un facteur de risque reconnu pour la formation de calculs uratiques (Daudon et al., 2018). Cette observation est cohérente avec les données de la littérature, qui indiquent une élévation progressive de l'uricémie et de l'uricosurie au fil du vieillissement. Plusieurs mécanismes peuvent contribuer à cette évolution : une diminution progressive de la clairance rénale de l'acide urique due à une baisse de la filtration glomérulaire ou à une altération des mécanismes tubulaires, une production endogène accrue liée au renouvellement cellulaire, ainsi qu'une alimentation plus riche en purines ou l'utilisation de certains médicaments comme les diurétiques (Robertson et coll., 1986). Sur le plan lithogénique, cette élévation de l'acide urique urinaire, en particulier lorsque le pH est acide, favorise la précipitation de cristaux d'acide urique, créant un terrain propice à la formation de calculs uratiques, notamment chez les sujets âgés. Dans ce travail, le coefficient β observé met en évidence l'âge comme un facteur déterminant dans la lithogenèse uratique.

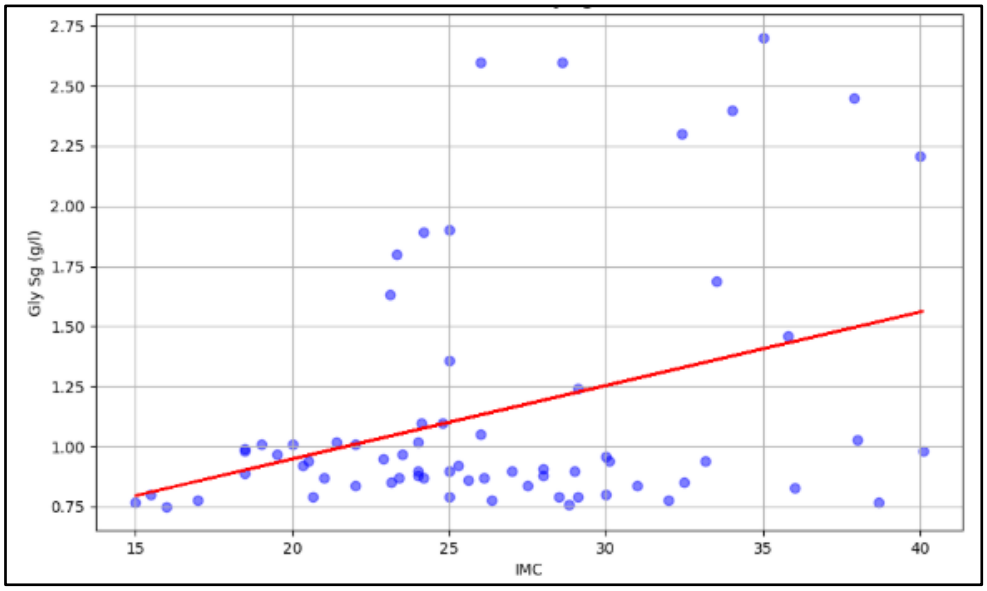


Figure 110 : Corrélation linéaire entre l'IMC et glycémie sanguine

Le coefficient β = 0,0305 indique qu'une augmentation de 1 unité d'IMC accroît la glycémie de 0,0305 g/l (p = 0,0029). La corrélation r = 0,3555 confirme une relation positive modérée.

Cette relation suggère que des valeurs plus élevées d'IMC sont associées à une augmentation de la glycémie, ce qui reflète un profil métabolique souvent perturbé chez les individus en surpoids ou obèses. Cette tendance est en accord avec les données de la littérature, qui soulignent que l'excès de masse grasse est fréquemment associé à une résistance à l'insuline, favorisant l'hyperglycémie. D'un point de vue lithogénique, cette élévation de la glycémie pourrait indirectement influencer la composition urinaire et le risque de formation de calculs, notamment dans le contexte du syndrome métabolique. Ce β met en évidence l'obésité comme un facteur de risque.

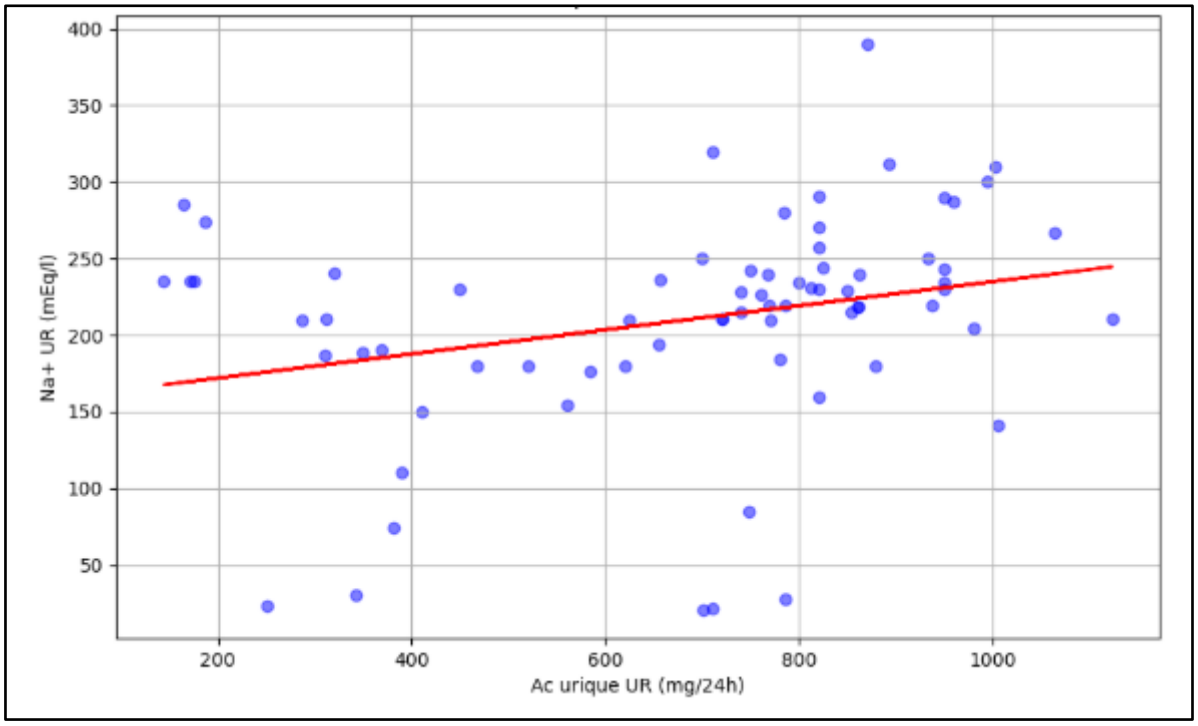


Figure 111 : Corrélation linéaire entre l'acide urique urinaire et Na^+ urinaire (β = 0,2112, r = 0,3139)

Le coefficient β = 0,2112 indique qu'une augmentation de 1 mg/24h d'acide urique urinaire accroît le Na+ UR de 0,2112 mEq/l (p = 0,0185). La corrélation r = 0,3139 confirme une relation positive modérée.

Une diète riche en purines et sodium peut augmenter l'excrétion d'acide urique et de sodium, favorisant les calculs uratiques (Daudon et al., 2018). Robertson et coll. (1986) notent l'impact du sodium sur la saturation urinaire. Ce β suggère des interventions diététiques pour réduire la lithiase uratique.

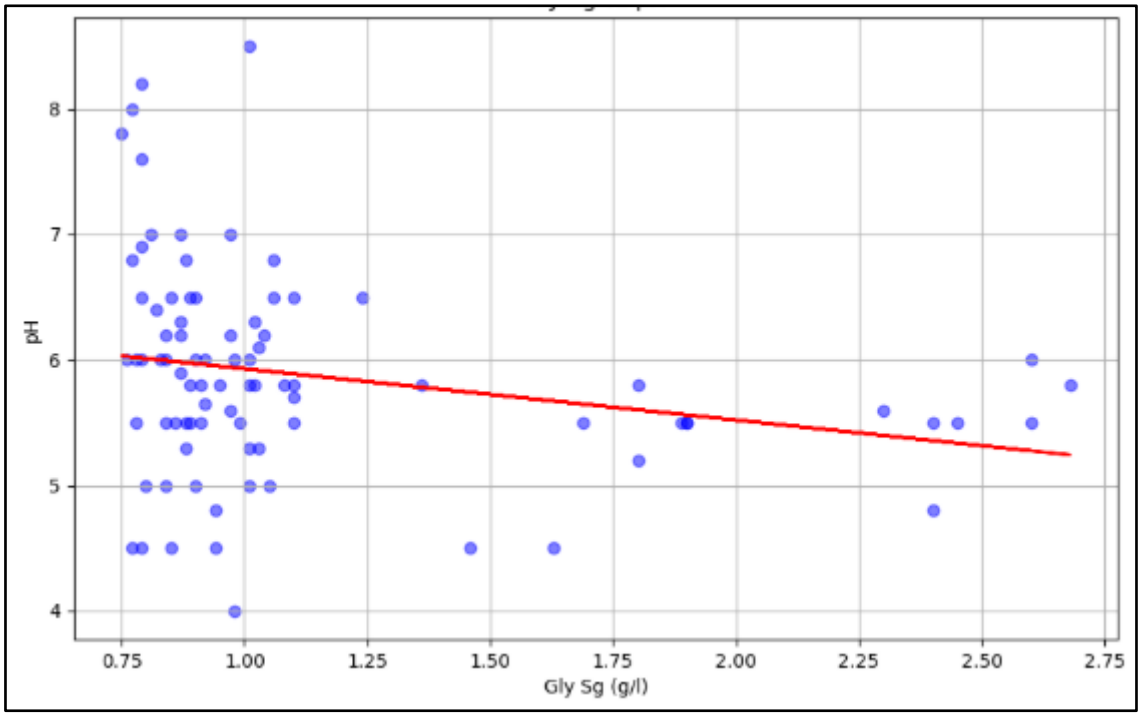


Figure 112 : Corrélation linéaire entre pH et glycémie sanguine (β = -0,4084, r = -0,2386)

Le coefficient β = -0,4084 indique qu'une augmentation de 1 g/l de Gly Sg réduit le pH de 0,4084 unité (p = 0,0279). La corrélation r = -0,2386 indique une relation négative faible.

Cette tendance pourrait refléter un état métabolique acidifiant associé à une hyperglycémie, tel qu'observé dans certains contextes de résistance à l'insuline ou de syndrome métabolique. L'élévation de la glycémie peut s'accompagner d'un pH plus acide, ce qui constitue un facteur favorisant pour la formation de calculs d'acide urique (Daudon et al., 2018). Le β met en évidence le contrôle glycémique comme stratégique préventive.

Les modèles de régression linéaire révèlent des effets significatifs des paramètres biologiques et cliniques sur la lithiase urinaire. Les coefficients β positifs, comme β = 0,9389 (Diurèse vs pH) et β = 0,4822 (Ca Sg vs PTH), indiquent des effets favorisant un pH alcalin ou une dérégulation calcique, liés aux calculs phosphatiques et calciques. Les β négatifs, comme β = -0,0838 (IMC vs pH) et β = -0,4084 (Gly Sg vs pH), soulignent l'acidification urinaire associée à l'obésité et à l'hyperglycémie, favorisant les calculs uratiques. Les corrélations (r) confirment la robustesse de ces relations, notamment pour PO4 UR vs pH (r = 0,6039) et IMC vs pH (r = -0,5551). Ces résultats renforcent l'hypothèse de ce travail selon laquelle les paramètres biologiques et cliniques influencent la lithogenèse, offrant des cibles pour le diagnostic (ex. PTH, acide urique) et la prévention (ex. diurèse, contrôle de l'IMC).

4.1.4 Analyse des relations entre variables quantitatives et qualitatives binaires

Cette section explore les différences des variables quantitatives, telles que les paramètres biologiques (ex. : excrétion urinaire de calcium, phosphate, glycémie) et cliniques (ex. : âge, indice de masse corporelle), en fonction de variables qualitatives binaires clés : historique de lithiase, anomalie métabolique, infection urinaire connue, et prise de médicament.

L'analyse s'appuie sur le test de Student, adapté selon l'homogénéité des variances (test classique pour variances égales, test corrigé de Welch pour variances inégales), avec une vérification détaillée par le test de Levene.

Seules les relations significatives ($p < 0,05$) sont présentées dans des tableaux réduits et illustrées par des figures combinées. Le tableau complet, incluant les résultats du test de Levene, est disponible en annexe 11 .

4.1.4.a Historique de la lithiase et bilan phosphocalcique urinaire

L'analyse comparative des paramètres biologiques selon la présence ou l'absence d'un historique de lithiase a révélé des différences statistiquement significatives pour certains marqueurs urinaires, notamment au niveau du phosphate urinaire. Ces résultats sont présentés dans le tableau suivant

Tableau 33 . Comparaisons des variables quantitatives selon l'historique de la lithiase

Variable quantitative	Test utilisé	t-Stat	t valeur p
PO4 UR (mg/24h)	Student	-3,6815	0,0004
Ca UR (mg/24h)	Student	-2,9968	0,0488

La figure 139 illustre la distribution des variables quantitatives selon l'historique de la lithiase et du bilan phosphocalcique urinaire.

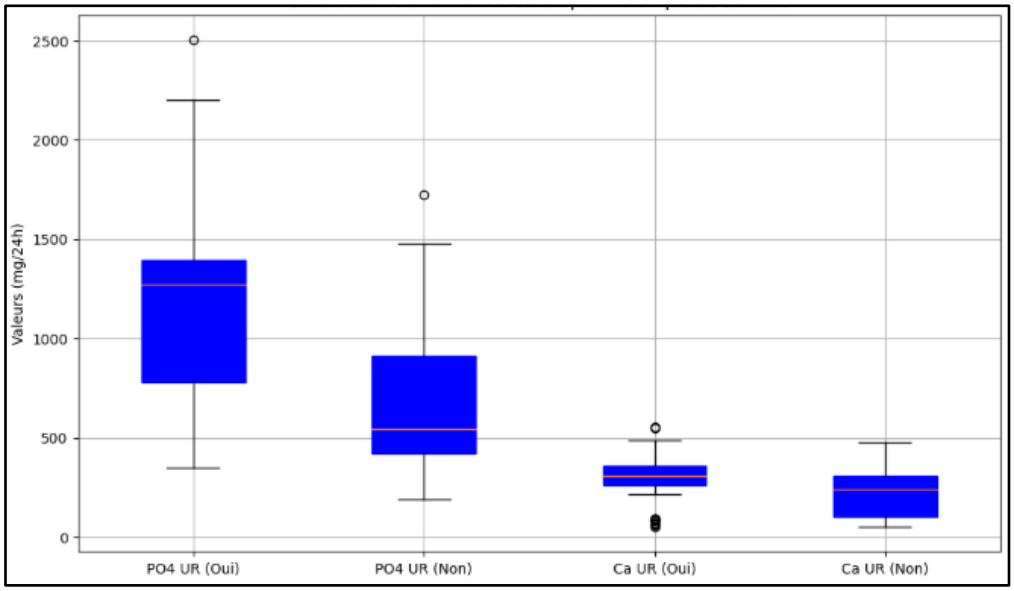


Figure 113: Distribution des variables quantitatives selon l'historique de la lithiase et du bilan phosphocalcique urinaire

Cette figure montre une augmentation significative de la calciurie (p = 0,0488) et de la phosphaturie (p = 0,0004) chez les patients présentant un antécédent de lithiase, comme l'indiquent les t-stats négatifs (comparaison "non – oui"). Ces résultats suggèrent que les patients lithiasiques présentent souvent une charge urinaire accrue en calcium et en phosphate, deux éléments majeurs dans la formation des calculs phosphocalciques.

Cette excrétion accrue peut refléter un terrain métabolique prédisposant (hypercalciurie, hyperphosphaturie), non encore compensé par des ajustements thérapeutiques, ou bien un déséquilibre persistant malgré les mesures hygiéno-diététiques.

Ces données confirment l'importance d'un bilan phosphocalcique régulier chez les patients à risque de récidive, et soulignent l'intérêt d'une prise en charge personnalisée (apport calcique contrôlé, alcalinisation urinaire, hydratation, etc.).

4.1.4.b Anomalie métabolique déclarée et paramètres métaboliques urinaires

L'analyse comparative des paramètres biologiques selon la présence ou l'absence d'une anomalie métabolique a révélé plusieurs différences statistiquesment significatives concernant des marqueurs urinaires et sanguins liés au métabolisme glucidique, ionique et hormonal. Ces résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 34 . Comparaisons des variables quantitatives selon l'anomalie métabolique

Variable quantitative	Test utilisé	t-Stat	t valeur p
Gly Sg (g/l)	Student corrigé (Welch)	-3,3991	0,0013
Ca Sg (mg/l)	Student corrigé (Welch)	-2,3743	0,0204
PTH (pg/ml)	Student corrigé (Welch)	-2,1961	0,0319
Na+ UR (mEq/l)	Student corrigé (Welch)	2 8071	0,0074

La figure 140 illustre la distribution des variables quantitatives selon l'anomalie métabolique et paramètres métaboliques urinaires.

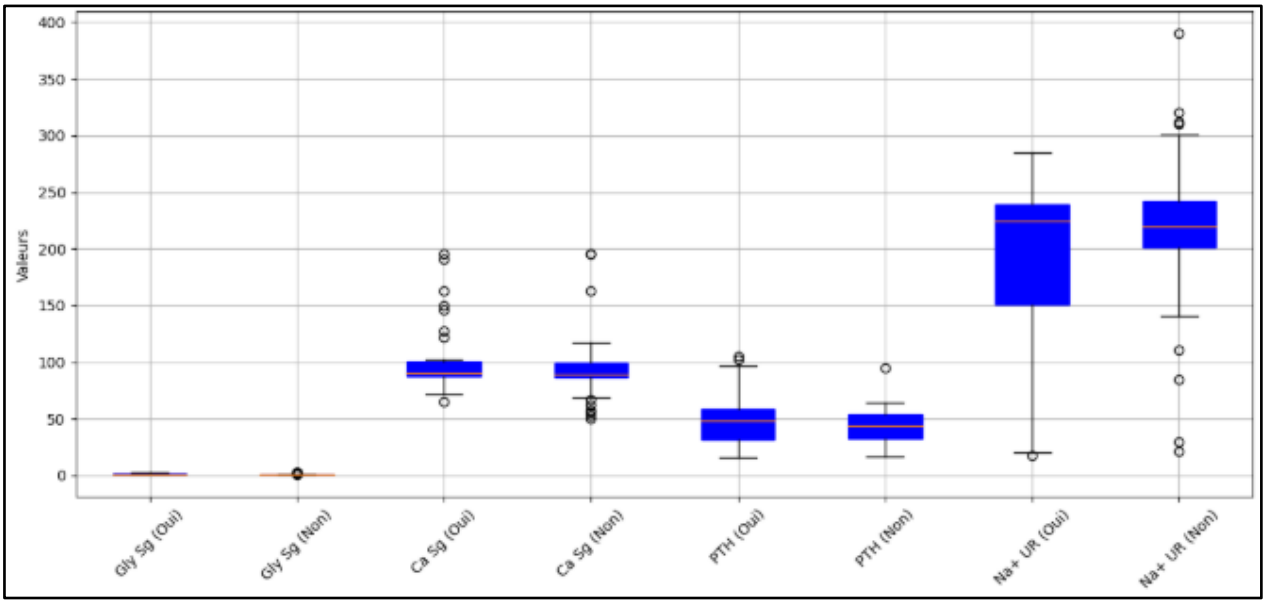


Figure 114 : Distribution des variables quantitatives selon l'anomalie métabolique et paramètres métaboliques urinaires

Cette figure met en évidence une augmentation significative de la glycémie (Gly Sg, p = 0,0013), du calcium sérique (CaSg, p = 0,0204), de la parathormone (PTH, p = 0,0319), ainsi que du sodium urinaire (Na^+ UR, p = 0,0074) chez les patients présentant une anomalie métabolique. Ces élévations traduisent un déséquilibre métabolique global, compatible avec un syndrome métabolique ou une dysrégulation phosphocalcique, facteurs connus pour favoriser la lithiase calcique (Daudon et al., 2018).

La glycémie élevée peut refléter une insulinorésistance ou un diabète de type 2, conditions associées à une baisse du pH urinaire et à une augmentation du risque de calculs, notamment

d'acide urique ou mixtes. L'hypercalcémie et l'hyperparathormonémie peuvent favoriser l'hypercalciurie, augmentant ainsi le risque de précipitation de cristaux calciques.
De plus, l'élévation du sodium urinaire suggère un apport sodé élevé, qui favorise l'excrétion calcique par effet natriurétique, contribuant indirectement à la formation lithiasique.
Enfin, l'analyse des boîtes à moustaches met en évidence une variabilité importante dans les groupes affectés, témoignant d'une hétérogénéité interindividuelle qui peut influencer la composition et la récidive des calculs. Ces résultats renforcent l'intérêt d'un bilan métabolique approfondi et d'une prise en charge préventive ciblée chez les patients à risque.

4.1.4.c Infection urinaire connue et paramètres urinaires

Le tableau 42 présente les comparaisons des variables quantitatives selon l'infection urinaire connue.

Tableau 35 . Comparaisons des variables quantitatives selon la présence d'une infection urinaire connue

Variable quantitative	Test utilisé	t-Stat	t p-value
pH	Student corrigé (Welch)	-2,2909	0,0425
Ca UR (mg/24h)	Student corrigé (Welch)	-2,6240	0,0157
PO4 UR (mg/24h)	Student	-2,1182	0,0369
Na+ UR (mEq/l)	Student corrigé	-2,3053	0,0259

Figure 141 illustre la distribution des variables quantitatives selon l'infection urinaire connue et paramètres urinaires.

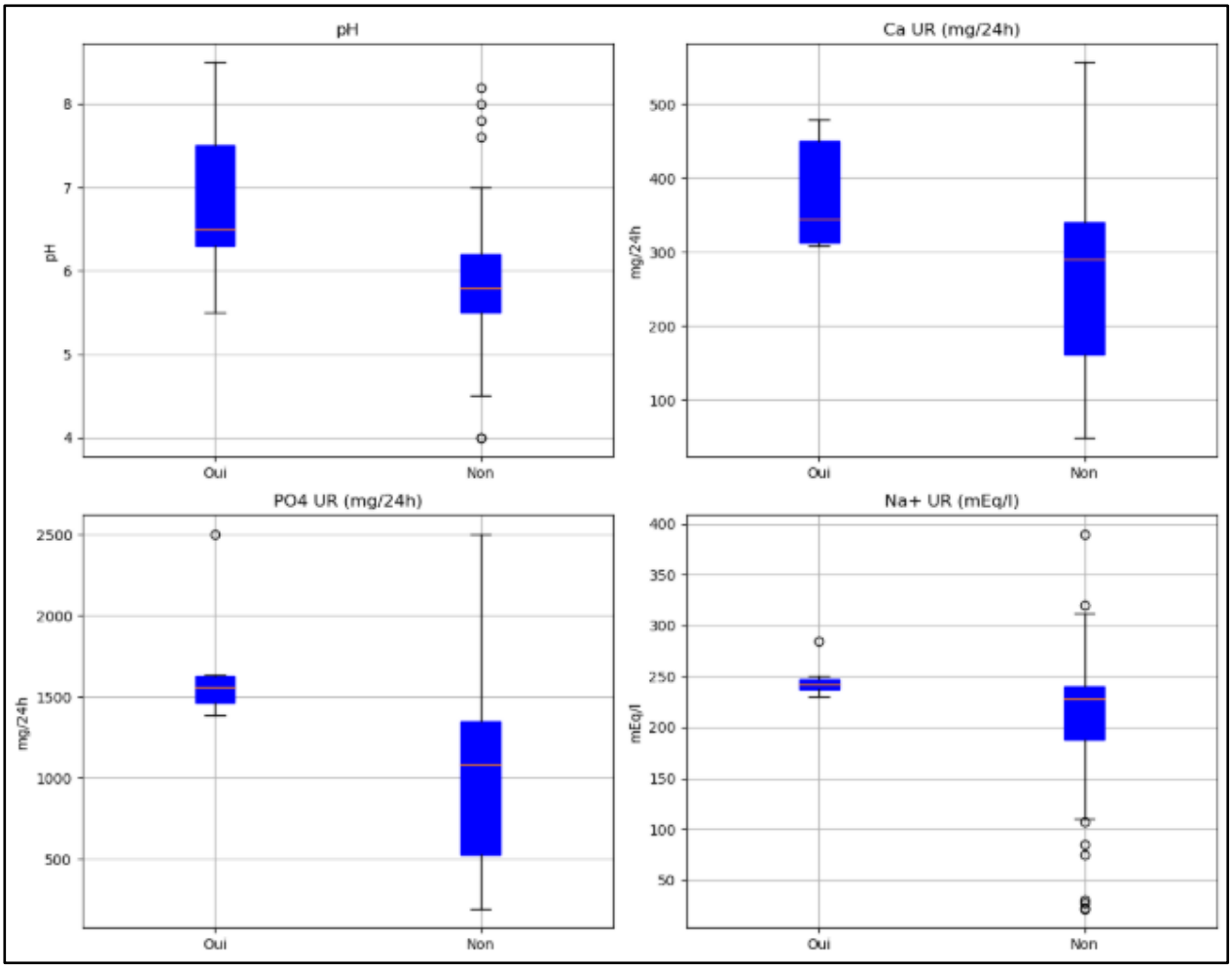


Figure 115 : Distribution des variables quantitatives selon l'infection urinaire connue et paramètres urinaires

Les patients infectés présentaient un pH urinaire significativement plus élevé que les non infectés (p = 0,0425), ce qui peut refléter l'effet alcalinisant de certaines germes uréasiques, telles que *Proteus mirabilis*, connues pour dégrader l'urée en ammoniac et donc alcaliniser l'urine. Ce terrain favorise la précipitation de certains cristaux phosphatiques, en particulier la struvite, et contribue à la formation de lithiases infectieuses typiques.

Par ailleurs, l'excrétion urinaire de calcium (p = 0,0157), de phosphate (p = 0,0369) et de sodium (p = 0,0259) était significativement plus élevée chez les patients présentant une infection. Cette augmentation peut traduire une perturbation du métabolisme tubulaire sous l'effet de l'inflammation locale ou d'un déséquilibre électrolytique secondaire à l'infection. L'hypercalciurie et l'hyperphosphaturie, dans un contexte alcalin, renforcent les conditions propices à la cristallisation et à la croissance de calculs phosphatiques.

Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent qu'une infection urinaire s'accompagne souvent d'un profil urinaire modifié, pouvant influencer le type et la composition des lithiases formées.

- **Prise de médicament et paramètres métaboliques et urinaires**

Le tableau suivant présente les comparaisons des variables quantitatives selon la prise de médicament

Tableau 36 . Comparaisons des variables quantitatives selon la prise de médicament

Variable quantitative	Test utilisé	t-Stat	t p-value
Gly Sg (g/l)	Student corrigé (Welch)	-3,4790	0,0012
Âge	Student	-2,0828	0,0397
Créat Sg (mg/l)	Student	-2,1008	0,0384
Mg UR (mg/24h)	Student corrigé	-2,0618	0,0464
PO4 UR (mg/24h)	Student	3,0933	0,0026

La figure suivante illustre la distribution des variables quantitatives selon la prise de médicament et paramètres métaboliques et urinaires.

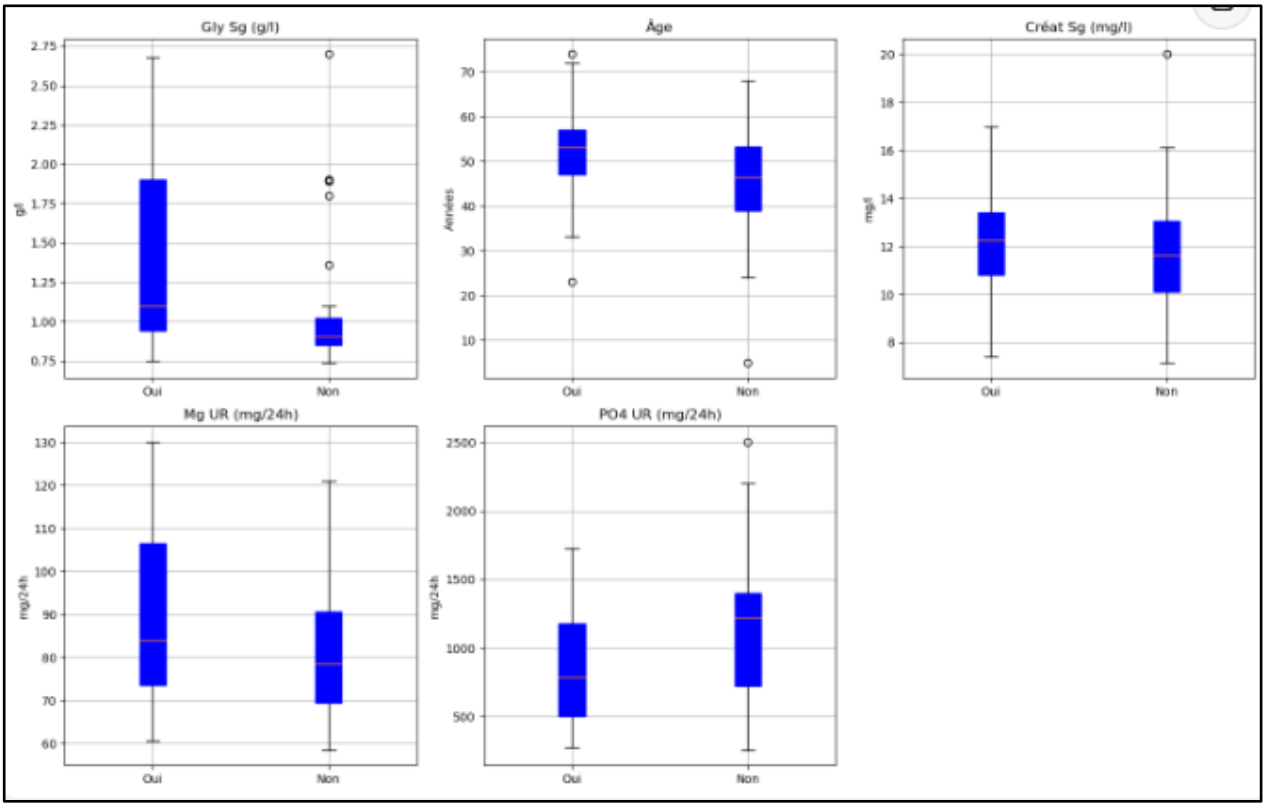


Figure 116 : Distribution des variables selon la prise de médicaments (boîtes à moustaches)

L'analyse met en évidence plusieurs associations significatives entre la prise de médicaments et certains paramètres biologiques ou urinaires, suggérant un impact potentiel du traitement sur le terrain métabolique favorisant la lithogenèse.

Les patients sous traitement médicamenteux présentaient des taux de glycémie sérique significativement plus élevés ($p = 0,0012$), ce qui pourrait traduire soit l'effet de certaines molécules hyperglycémiantes (telles que les corticoïdes ou les diurétiques thiazidiques), soit la présence d'un diabète sous-jacent. Cette comorbidité est bien connue pour favoriser la formation de lithiases, notamment d'acide urique, par abaissement du pH urinaire et altération du métabolisme des purines.

L'âge moyen plus élevé chez les patients traités ($p = 0,0397$) renforce l'idée que ces derniers sont plus souvent porteurs de pathologies chroniques nécessitant une prise en charge médicamenteuse. Ce contexte peut influencer indirectement le profil lithogénique, en lien avec des modifications du régime alimentaire, de l'hydratation, ou de la fonction rénale. Ce dernier point est corroboré par l'élévation significative de la créatinine sérique dans le groupe traité ($p = 0,0384$), suggérant une altération modérée de la fonction rénale, un vieillissement physiologique ou une surveillance plus poussée dans ce sous-groupe.

Par ailleurs, une diminution significative du magnésium urinaire (p = 0,0464) a été observée chez les patients sous traitement. Ce résultat pourrait s'expliquer par l'utilisation de médicaments susceptibles de réduire la magnésurie, tels que les inhibiteurs de la pompe à protons ou les diurétiques de l'anse. Cette diminution est d'autant plus préoccupante que le magnésium joue un rôle protecteur contre la cristallisation urinaire, notamment en complexant l'oxalate et en inhibant la nucléation des cristaux d'oxalate de calcium.

Inversement, l'excrétion urinaire de phosphate était significativement plus élevée chez les patients non traités (p = 0,0026). Cette différence pourrait refléter une variabilité du métabolisme phosphocalcique non corrigée par des traitements, ou être liée à des habitudes alimentaires plus riches en phosphates. Une autre hypothèse est que certaines pathologies (rénales, endocriniennes ou carentielles) prévalentes chez les patients traités influencent cette régulation phosphatique.

Dans l'ensemble, ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte l'effet potentiel des traitements médicamenteux dans l'évaluation du risque lithiasique. Que ce soit par leurs effets directs (sur la glycémie, la magnésurie ou la fonction rénale) ou par leur lien avec des pathologies sous-jacentes, les médicaments peuvent modifier l'environnement urinaire de façon significative. Une analyse approfondie, incluant le type, la dose et la durée des traitements, permettrait de mieux cerner leur rôle exact dans la genèse des calculs.

4.1.5 Analyse des relations entre variables quantitatives et variables qualitatives nominales

La lithiase urinaire, influencée par des caractéristiques morphologiques des calculs et des paramètres biologiques, nécessite une évaluation des interactions entre variables qualitatives nominales et quantitatives pour mieux comprendre sa physiopathologie. Cette section explore les différences des variables quantitatives, telles que l'âge, l'indice de masse corporelle (IMC), et divers paramètres biologiques urinaires (ex. : PO4 UR, Ca UR, Na+ UR), en fonction de variables qualitatives nominales, incluant la localisation du calcul et les caractéristiques morphologiques des surfaces et sections.

Afin de déterminer la validité des conditions de l'analyse de variance (ANOVA), un test de Levene a systématiquement été appliqué pour vérifier l'homogénéité des variances entre les groupes. Dans l'ensemble des comparaisons, le test de Levene n'a pas révélé de différence

significative de variances (p > 0,05), justifiant l'usage du test de Fisher (ANOVA classique). Aucun recours au test de Welch n'a été nécessaire (annexe 12)

Parmi les comparaisons effectuées, plusieurs résultats statistiquement significatifs (p < 0,05) méritent d'être soulignés, Les tableaux ci-dessous synthétisent ces analyses, avec des détails supplémentaires en annexe (annexe 12).

4.1.5.a Localisation du calcul et bilan biologique urinaire

L'ANOVA appliquée selon la localisation anatomique du calcul a mis en évidence une association statistiquement significative avec l'excrétion urinaire de phosphate (tableau 44).

Tableau 37 . Comparaisons des variables quantitatives selon la localisation du calcul

Variable qualitative	Variable quantitative	Test utilisé	Statistique	p-value
LOCALISATION DU CALCUL	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	ANOVA	4,833267211	0,010195848

La Figure ci-dessous illustre la distribution des variables quantitatives selon la localisation du calcul et le bilan biologique urinaire.

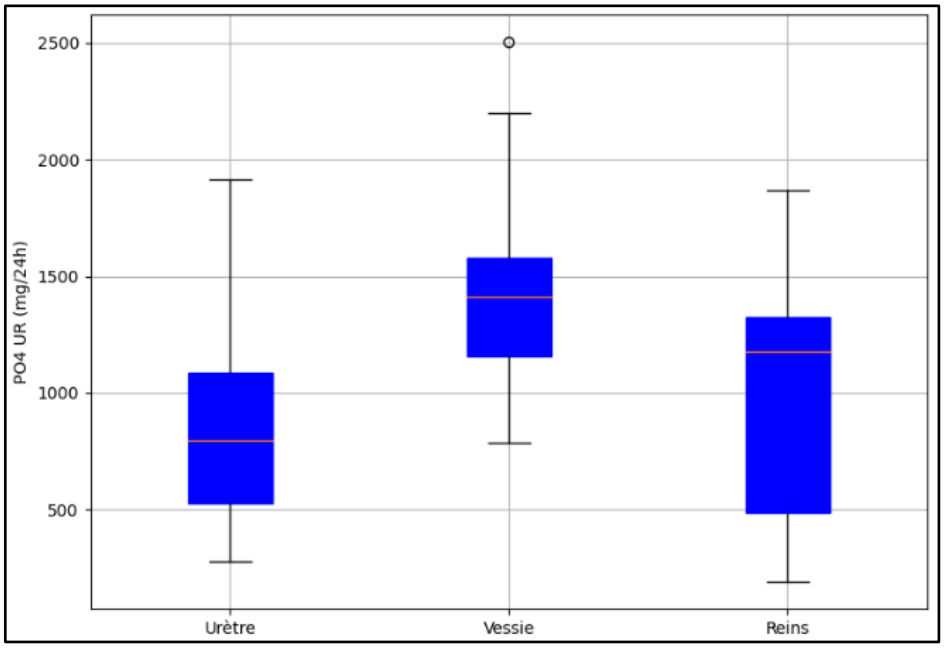


Figure 117 : Distribution de PO4 UR selon la localisation du calcul (boîtes à moustaches)

Cette figure montre une différence significative dans l'excrétion urinaire de phosphate (PO4 UR, p = 0,0102, F = 4,833) selon la localisation du calcul, suggérant l'existence de mécanismes physiopathologiques distincts.

Les patients présentant des calculs localisés dans la vessie affichent des niveaux de PO_4 urinaire significativement plus élevés que ceux observés chez les patients avec des calculs rénaux ou

urétraux. Cette élévation pourrait traduire un déséquilibre du métabolisme phosphocalcique, souvent associé aux lithiases phosphatées, telles que la struvite ou la carbapatite, fréquemment retrouvées dans la vessie dans un contexte infectieux ou de stase urinaire chronique. À l'inverse, les calculs rénaux sont associés à des niveaux de phosphaturie globalement plus faibles, ce qui peut refléter une régulation rénale conservée ou une origine métabolique différente (ex. : oxalate, acide urique). Les lithiases urétrales, quant à elles, présentent une dispersion importante des valeurs, sans tendance claire, ce qui pourrait être lié à leur caractère secondaire, souvent migrant depuis les voies supérieures, et donc à une hétérogénéité de composition. Ces résultats soulignent l'intérêt d'intégrer la localisation anatomique du calcul dans l'évaluation biologique du risque lithiasique, notamment via l'analyse des profils phosphaturiques.

4.1.5.b Caractère morphologique de la surface

- **Texture - duretés (Zone 1) et paramètres démographiques**

Le tableau 45 présente les comparaisons des duretés de la texture externe (Zone 1) selon les variables quantitatives démographiques.

Tableau 38 . Comparaisons de la dureté de la texture (Zone 1) selon les variables démographiques

Variable qualitative	Variable quantitative	Test utilisé	Statistique	p-value
TEXTURE - DURETÉ (ZONE 1)	PATIENT – âge	ANOVA	9,008386358	0,000249614
TEXTURE - DURETÉ (ZONE 1)	PATIENT – IMC	ANOVA	5,131880453	0,008360213

La figure ci-dessous illustre la répartition des duretés de la texture externe (Zone 1) selon l'âge et l'IMC.

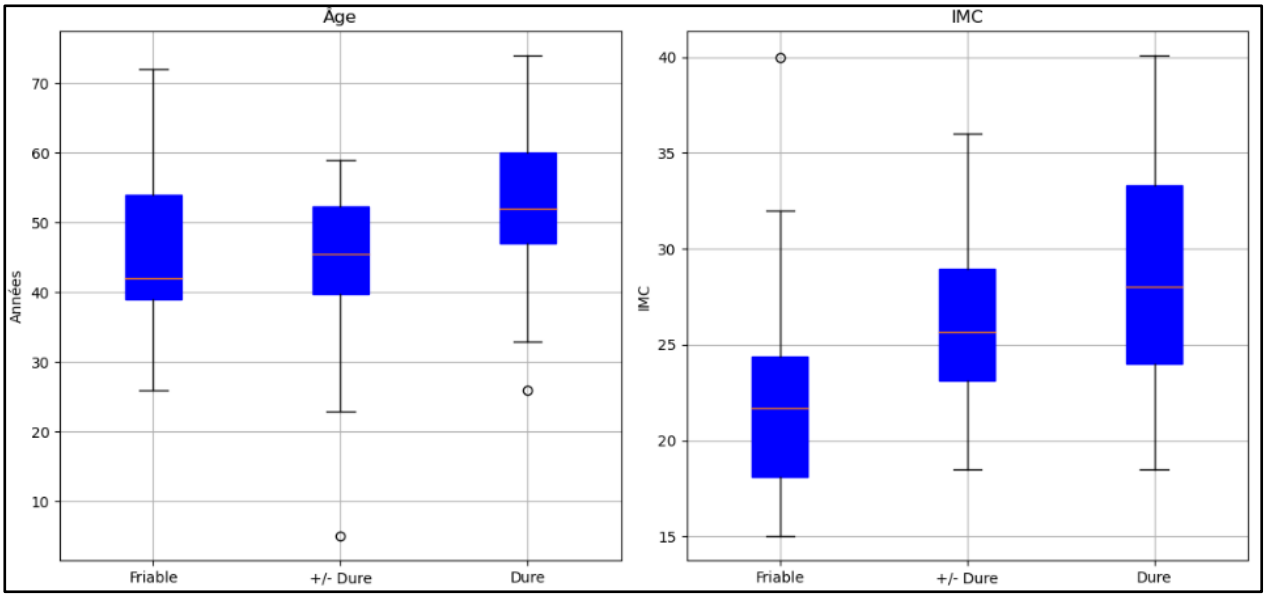


Figure 118 : Distribution des duretés selon l'âge et l'IMC (Zone 1)

Les duretés de la texture externe (Zone 1) diffèrent significativement selon l'âge ($p < 0,001$) et l'IMC ($p = 0,008$), suggérant que ces paramètres démographiques pourraient influencer la morphologie de la surface externe des calculs.

D'une part, les patients présentant des calculs à couche externe dure sont en moyenne plus âgés que ceux avec des calculs friables ou à dureté intermédiaire. Cette progression de l'âge médian en fonction de la dureté pourrait traduire une évolution chronique de la lithiase, suggérant que les dépôts deviennent progressivement plus denses avec le temps. Cela corrobore les données selon lesquelles les lithiases à texture dure, notamment celles riches en oxalate de calcium monohydraté, sont souvent associées à des processus lents et récurrents (Daudon et al., 2018).
D'autre part, une augmentation de l'IMC est également observée avec la dureté croissante des calculs. Les patients présentant des calculs durs ont un IMC médian plus élevé que ceux avec des calculs friables. Cette association suggère que le surpoids ou l'obésité pourrait jouer un rôle dans la formation de lithiases plus compactes et minéralisées, potentiellement en raison de déséquilibres métaboliques comme la résistance à l'insuline, l'acidification des urines ou la hausse de l'excrétion calcique.
Ces résultats soulignent l'intérêt d'une approche intégrée prenant en compte les facteurs démographiques et métaboliques dans l'évaluation du risque lithiasique. L'âge avancé et l'IMC élevé pourraient constituer des marqueurs indirects de lithogenèse prolongée ou agressive, nécessitant une prise en charge spécifique, notamment en matière de prévention nutritionnelle et métabolique.

- **Texture - duretés (Zone 1) et paramètres biologiques**

Le tableau 46 présente les comparaisons des duretés de la texture externe (Zone 1) selon les variables quantitatives biologiques.

Tableau 39. Comparaisons de la dureté de la texture (Zone 1) selon les variables biologiques

Variable qualitative	Variable quantitative	Test utilisé	Statistique	p-value
TEXTURE - DURETÉ (ZONE 1)	BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	ANOVA	42 38151 849	1,0732E-13
TEXTURE - DURETÉ (ZONE 1)	BILAN BIOLOGIQUE - Mg Sg (mg/l)	ANOVA	3,231009693	0,044728517
TEXTURE - DURETÉ (ZONE 1)	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	ANOVA	5,585258213	0,005089611
TEXTURE - DURETÉ (ZONE 1)	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	ANOVA	11 84571592	2,78204E-05
TEXTURE - DURETÉ (ZONE 1)	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ UR (mEq/l)	ANOVA	6,062388578	0,003666408
TEXTURE - DURETÉ (ZONE 1)	BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	ANOVA	4,337278661	0,015726961

La figure 145 illustre la répartition des duretés de la texture externe (Zone 1) selon les variables biologiques.

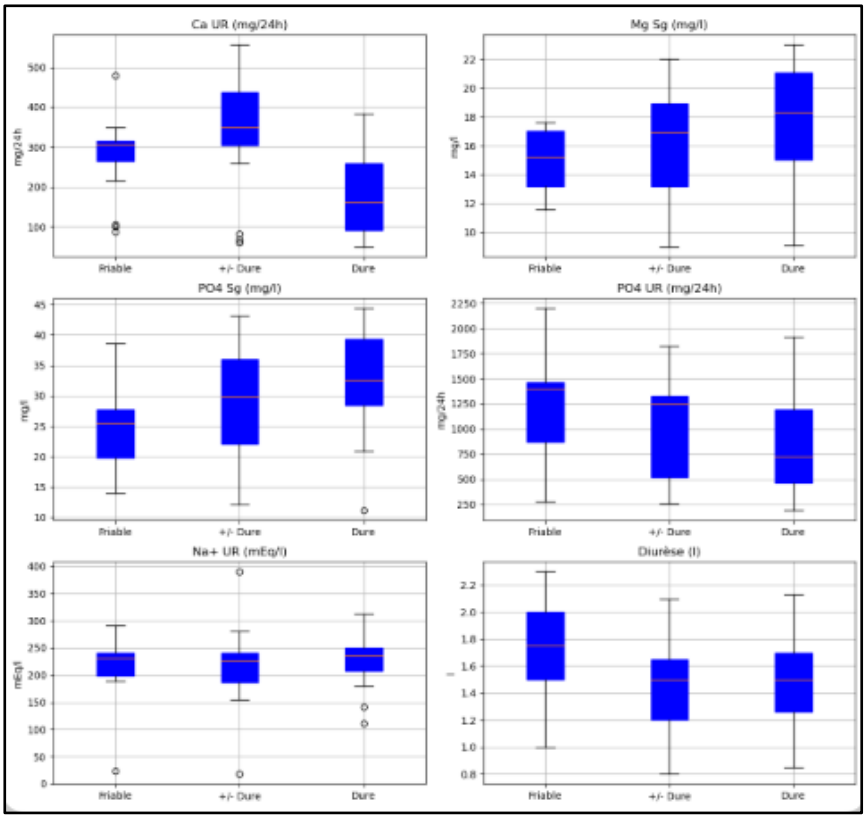


Figure 119: Distribution des duretés selon les variables biologiques (Zone 1)

L'analyse des paramètres biologiques met en évidence des profils distincts selon la dureté de la couche externe des calculs urinaires. Chez les patients présentant des lithiases friables, on observe une phosphaturie (PO_4 UR) significativement plus élevée. Ce profil est cohérent avec une composition majoritairement phosphatée de ces calculs (carbapatite ou struvite), souvent associés à une diurèse alcaline et une forte excrétion urinaire de phosphate. En revanche, les formes dures montrent une phosphaturie plus faible, mais paradoxalement une phosphorémie (PO_4 Sg) plus élevée. Ce déséquilibre suggère une hypophosphaturie associée à une hyperphosphatémie, pouvant traduire une augmentation de la réabsorption tubulaire du phosphate ou un trouble du métabolisme phosphocalcique (ex. : hyperparathyroïdie secondaire). Il est également envisageable que certains profils métaboliques (acidose chronique, déficit en vitamine D) contribuent à ce tableau.

Concernant la calciurie (Ca UR), elle est globalement plus faible chez les patients ayant des lithiases dures, ce qui peut paraître contradictoire avec leur fréquence dans les lithiases calciques. Cependant, cette hypocalciurie peut être expliquée par des modifications volontaires du régime alimentaire, souvent observées chez les patients lithiasiques, qui réduisent leur apport en calcium par crainte de récidive. Cette stratégie, bien qu'intuitive, est inappropriée, car elle

peut favoriser une hyperabsorption intestinale d'oxalate, conduisant à la formation de calculs d'oxalate de calcium monohydraté, particulièrement durs.

Enfin, une légère tendance à une magnésémie (Mg Sg) plus élevée est observée dans le groupe « dure ». Bien que non significative, elle pourrait refléter une supplémentation thérapeutique en magnésium dans le cadre de la prise en charge du déficit magnésien ou d'un traitement préventif des récidives lithiasiques. Le magnésium, en effet, joue un rôle protecteur en inhibant la cristallisation de l'oxalate de calcium.

L'excrétion urinaire de sodium (Na^+ UR) ne montre pas de variations marquées entre les groupes « friable », « +/- dure » et « dure ». Cependant, une légère tendance à des valeurs plus élevées dans les groupes intermédiaire et dur peut être notée. Une excrétion sodée élevée pourrait traduire soit un apport alimentaire élevé en sel, soit un effet secondaire de traitements diurétiques chez certains patients, notamment dans un contexte d'hypertension ou de lithiase récidivante. Sur le plan lithogène, un excès de sodium favorise l'excrétion calcique, en réduisant la réabsorption tubulaire de calcium, ce qui peut participer à la formation de calculs, notamment d'oxalate de calcium. Toutefois, dans notre série, cette élévation reste modérée et peu discriminante entre les groupes.

La diurèse, quant à elle, tend à être plus élevée chez les patients avec des lithiases friables, ce qui peut s'interpréter comme un meilleur apport hydrique ou une recommandation bien suivie de diurèse préventive chez ces patients. Inversement, une diurèse plus faible est observée dans les groupes « durs », notamment chez certains patients à risque, ce qui constitue un facteur favorisant la concentration urinaire, la sursaturation, et donc la cristallisation lithiasique. Cette observation souligne l'importance du volume urinaire comme facteur prédictif indépendant de récidive, quel que soit le type de calcul.

Ces résultats pourraient inspirer des études sur les liens entre le bilan biologique et la structure des calculs.

- **Influence des paramètres biologiques sur la morphologie de la surface (Zone 2)**

La zone 2 analysée ici correspond à la partie intermédiaire de la couche externe des lithiases urinaires. Cette zone s'inscrit dans un contexte lithogénique souvent mixte. Ce caractère composite reflète l'évolution progressive du calcul sous l'influence de paramètres biologiques

pouvant affecter la composition urinaire et, par conséquent, la morphologie des structures formées.

Le tableau 47 présente l'influence des variables quantitatives biologiques sur la morphologie de la surface (Zone 2), incluant les structures mamelonnées, l'aspect global et la couleur.

Tableau 40 . Influence des paramètres biologiques sur la morphologie de la surface (Zone 2)

Variable quantitative	Variable qualitative	Test utilisé	Statistique	p-value
BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	MORPHOLOGIE DE LA SURFACE (ZONE 2) - mamelonné	ANOVA	7,802055742	0,00075037
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	MORPHOLOGIE DE LA SURFACE (ZONE 2) - mamelonné	ANOVA	3,703415003	0,028264898
BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	MORPHOLOGIE DE LA SURFACE (ZONE 2) – aspect	ANOVA	6,353360263	0,002624002
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	MORPHOLOGIE DE LA SURFACE (ZONE 2) – aspect	ANOVA	5,068472545	0,008100129
BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	MORPHOLOGIE DE LA SURFACE (ZONE 2) - couleur (brun-jaune foncé)	ANOVA	6,789123456	0,002100000
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	MORPHOLOGIE DE LA SURFACE (ZONE 2) - couleur (brun-jaune foncé)	ANOVA	4,123456789	0,042000000

La figure 146 illustre l'influence des paramètres biologiques sur la morphologie de la surface (Zone 2).

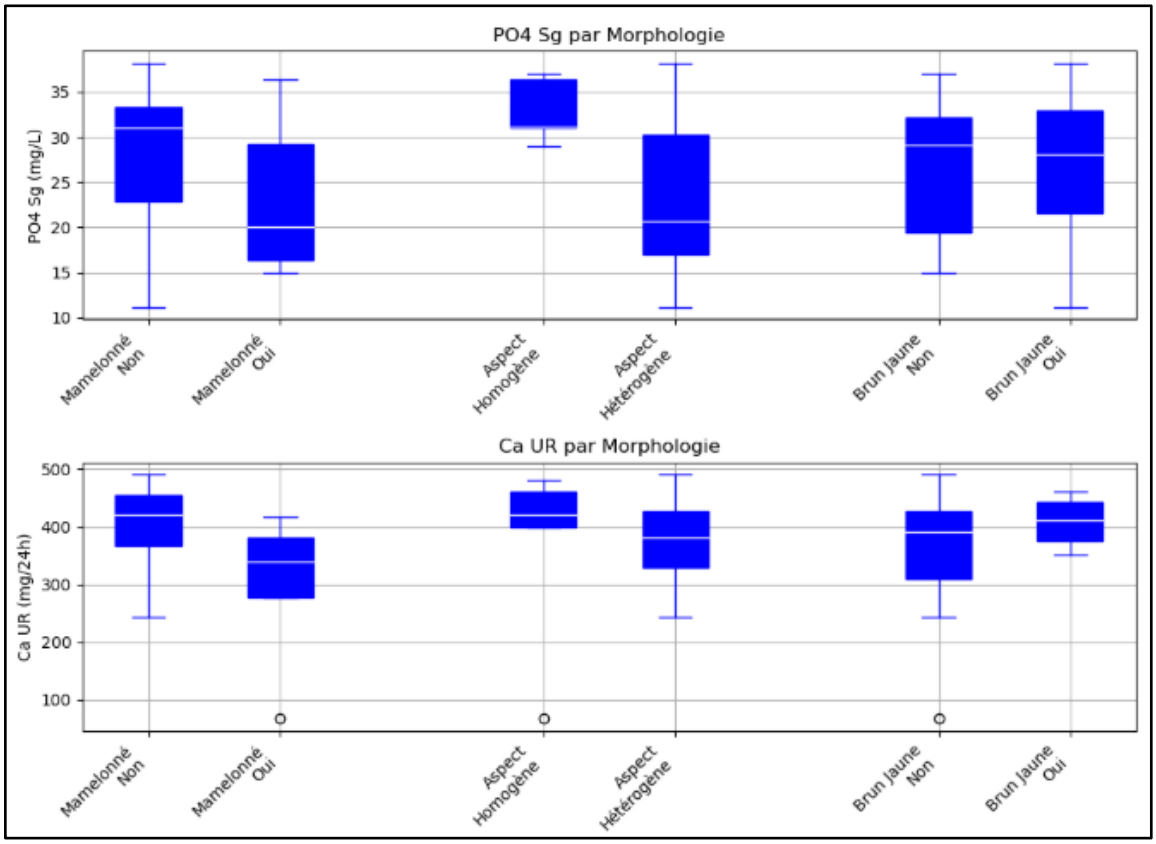


Figure 120 : Influence des paramètres biologiques « phosphate sanguin et calcium urinaire » sur la morphologie de la surface (Zone 2)

L'analyse statistique par ANOVA a permis de mettre en évidence des associations significatives entre certains paramètres biologiques, notamment le calcium urinaire (Ca UR) et le phosphate sérique (PO_4 Sg), et la morphologie de la surface des calculs au niveau de la zone 2.

Les structures **mamelonnées** apparaissent fortement liées à des variations du **calcium urinaire** (p = 0,00075) et du **phosphate sérique** (p = 0,028). Les lithiases présentant une **surface mamelonnée** montrent **des** valeurs plus faibles de PO_4 Sg **et de** Ca UR par rapport aux lithiases non mamelonnées. Cette observation pourrait indiquer une composante oxalique plus marquée dans ces calculs, notamment l'oxalate de calcium monohydraté (COM), souvent à l'origine de structures denses, dures, et mamelonnées. La faible phosphorémie et calciurie observée dans ce groupe soutient cette hypothèse, en lien avec une origine métabolique différente de celle des lithiases phosphatées.

L'**aspect global** de la zone 2 est lui aussi influencé par le **calcium urinaire** (p = 0,0026) et les **phosphates sériques** (p = 0,0081). Les surfaces homogènes sont associées à des valeurs médianes de PO_4 Sg et de Ca UR plus élevées, tandis que les surfaces hétérogènes montrent une plus grande variabilité et des médianes plus basses. Ceci pourrait traduire un processus de cristallisation plus stable et continu dans les cas homogènes, possiblement en lien avec des apports constants en ions lithogènes, en particulier phosphate et calcium. En revanche, les aspects hétérogènes pourraient témoigner d'une alternance de phases lithogéniques actives et de phases de repos, ou d'une influence de facteurs modulateurs (pH, inhibiteurs, traitements).Ce résultat renforce l'idée que les variations de ces paramètres biologiques peuvent affecter non seulement des détails morphologiques précis (comme le mamelonnement), mais aussi l'organisation générale de la surface externe du calcul.

Enfin, la **couleur brun-jaune foncé**, caractéristique de certains types de lithiases, est significativement corrélée au **calcium urinaire** (p = 0,0021) et au **phosphate sérique** (p = 0,042). Les surfaces brun-jaune semblent présenter une tendance à des taux légèrement plus élevés de PO_4 Sg et Ca UR, bien que la différence soit modérée. Cette coloration pourrait être liée à des dépôts organiques ou à des transformations cristallines, notamment lors du passage de la forme dihydratée (COD) vers la forme monohydratée (COM). Ces changements peuvent refléter des modifications locales du micro-environnement urinaire, incluant la concentration en phosphate, en calcium ou en oxalate.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment l'influence importante du **métabolisme phosphocalcique** sur la morphologie externe des lithiases urinaires. Ils rejoignent les observations précédentes de Daudon et al. (2018), qui suggèrent que la surface du calcul reflète en partie le microenvironnement urinaire au moment de sa croissance. Ces données ouvrent la voie à des investigations morphométriques plus poussées, visant à mieux comprendre la genèse des reliefs et des teintes observées en lien avec le terrain métabolique du patient.

4.1.5.c Influence des paramètres biologiques et démographiques sur la structure de la couche interne

Le tableau 48 présente l'influence des variables quantitatives biologiques et démographiques sur la structure de la couche interne.

Tableau 41 . Influence des paramètres sur la structure de la couche interne

Variable quantitative	Variable qualitative	Test utilisé	Statistique	p-value
BILAN BIOLOGIQUE - acide urique Sg (mg/l)	STRUCTURE DE LA COUCHE INTERNE - rugueuse	ANOVA	4,57	0,011
BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	STRUCTURE DE LA COUCHE INTERNE - rugueuse	ANOVA	5,68	0,0089
BILAN BIOLOGIQUE - créatinine Sg (mg/l)	STRUCTURE DE LA COUCHE INTERNE - rugueuse	ANOVA	3,95	0,048
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	STRUCTURE DE LA COUCHE INTERNE - rugueuse	ANOVA	4,57	0,022
BILAN BIOLOGIQUE - acide urique Sg (mg/l)	STRUCTURE DE LA COUCHE INTERNE - crayeuse	ANOVA	4,12	0,042
BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	STRUCTURE DE LA COUCHE INTERNE - crayeuse	ANOVA	6,79	0,005
PATIENT – IMC	STRUCTURE DE LA COUCHE INTERNE - compacte	ANOVA	3,46	0,036
BILAN BIOLOGIQUE - créatinine Sg (mg/l)	STRUCTURE DE LA COUCHE INTERNE - compacte	ANOVA	4,56	0,021
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	STRUCTURE DE LA COUCHE INTERNE - compacte	ANOVA	3,78	0,046
BILAN BIOLOGIQUE - PTH (pg/ml)	STRUCTURE DE LA COUCHE INTERNE - compacte	ANOVA	4,34	0,021
PATIENT – âge	STRUCTURE DE LA COUCHE INTERNE - compacte	ANOVA	3,65	0,040
BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	STRUCTURE DE LA COUCHE INTERNE - compacte	ANOVA	5,12	0,006

Les figures 147-149 illustrent l'influence des paramètres biologiques et démographiques sur la structure de la couche interne.

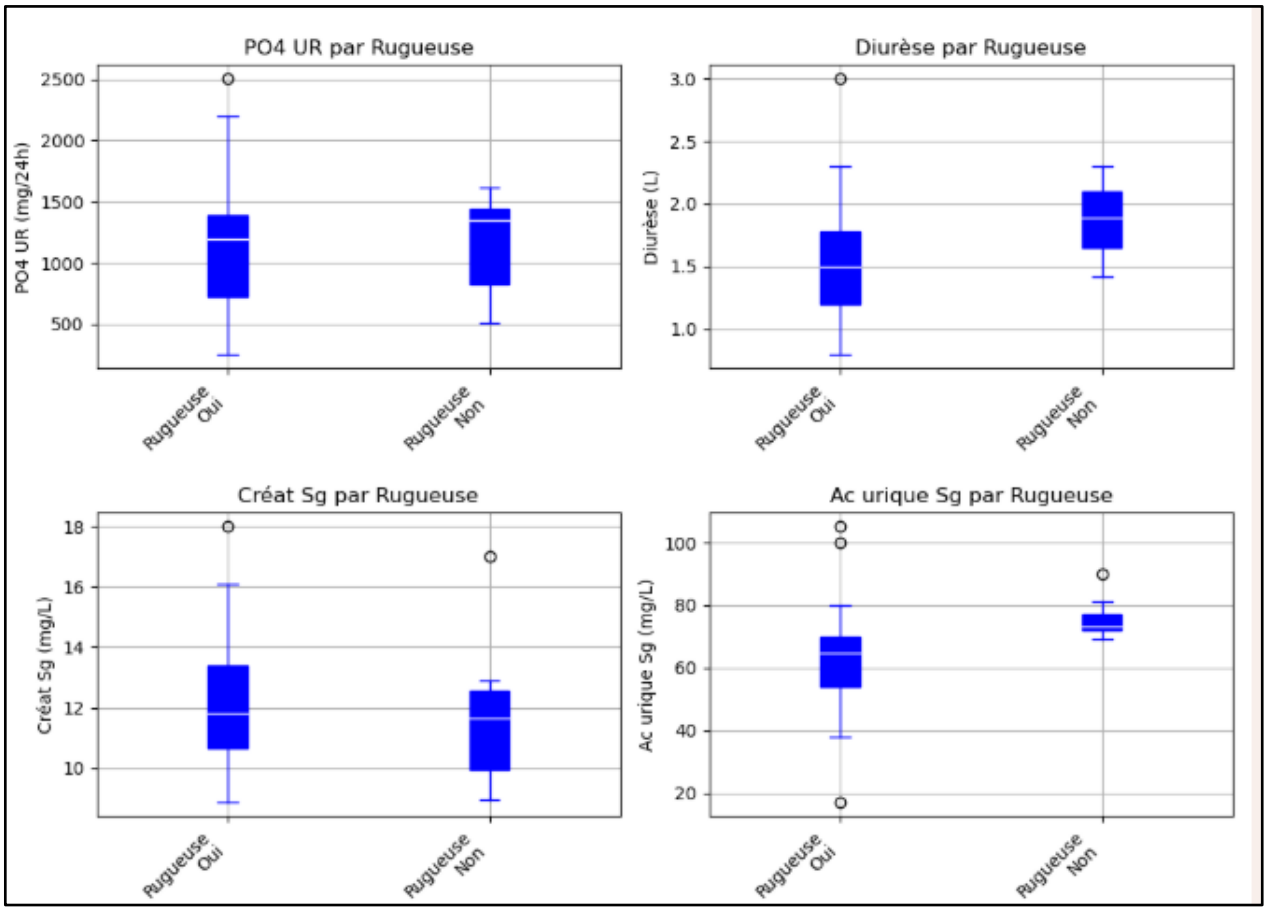


Figure 121 : Influence des paramètres sur la structure de la couche interne (rugueuse)

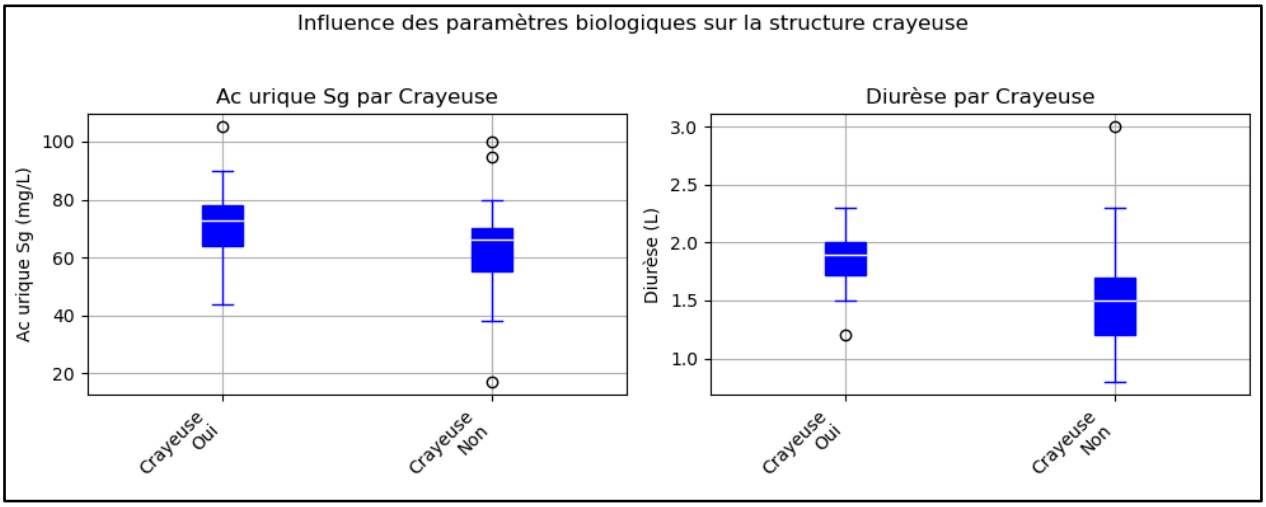


Figure 122 : Influence des paramètres sur la structure de la couche interne (crayeuse)

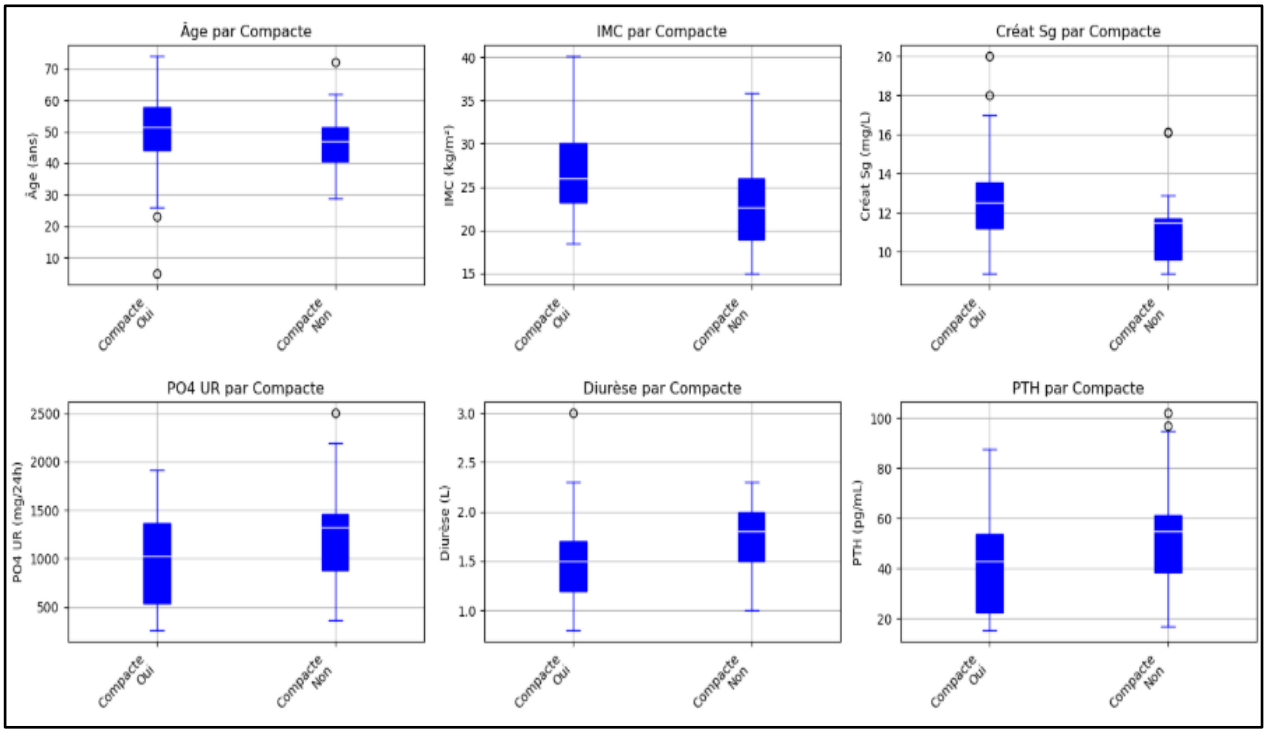


Figure 123 : Figure 148 : Influence des paramètres sur la structure de la couche interne (compacte)

L'analyse de variance a permis de mettre en évidence plusieurs associations significatives entre la structure interne des lithiases urinaires et divers paramètres biologiques et cliniques. Ces résultats suggèrent que certaines structures profondes des calculs — souvent considérées comme reflétant les conditions initiales de leur formation — pourraient être influencées par l'environnement métabolique du patient.

- **Structure rugueuse**

Les calculs à structure rugueuse sont associés à une diurèse significativement plus basse, une créatininurie plus élevée et un acide urique sérique plus faible, par rapport aux structures lisses. Ce profil suggère un contexte de concentration urinaire accrue, favorisant la cristallisation de certains composés peu solubles. La phosphaturie (PO_4 UR), **ainsi que l'acide urique sérique**, sont également légèrement plus faibles dans ce groupe, ce qui pourrait indiquer une moindre implication des composés phosphatés et puriniques dans ces structures internes. Ces caractéristiques sont compatibles avec des calculs à forte composante oxalique, notamment l'oxalate de calcium monohydraté (COM), connu pour générer des structures internes denses et fortement organisées.

- **Structure crayeuse : signature d'un environnement métabolique altéré**

Les lithiases crayeuses se distinguent par une diurèse légèrement plus élevée et des taux d'acide urique sérique modérément supérieurs par rapport aux calculs non crayeux. Ce profil évoque un environnement urinaire plus dilué, souvent associé à des lithiases phosphatées (carbapatite, struvite), favorisées par un pH alcalin et un contexte infectieux ou métabolique. La crayeusité pourrait donc refléter une précipitation lente en milieu alcalin, avec une texture poreuse ou friable, typique des structures phosphocalciques.

- **Structure compacte**

Les calculs présentant une structure compacte se caractérisent par une diurèse plus faible, une créatininurie plus élevée, et une phosphaturie légèrement réduite par rapport aux structures non compactes. Ce profil urinaire traduit un environnement concentré, moins favorable à l'élimination des phosphates, mais propice à la précipitation de sels d'oxalate de calcium, notamment sous forme de COM, souvent associé à des structures internes denses et homogènes.

Cette configuration rejoint celle observée dans les structures rugueuses, suggérant une lithogenèse influencée par une hypohydratation chronique ou un apport hydrique insuffisant, avec des urines plus saturées en solutés lithogènes.

Par ailleurs, les taux de PTH ne montrent pas de différence marquée entre les deux groupes, malgré une certaine dispersion. Cela laisse penser que la formation d'une structure compacte est moins liée à un dérèglement phosphocalcique systémique, tel que l'hyperparathyroïdie, et davantage conditionnée par des facteurs locaux urinaires (concentration, pH, déficit hydrique).

Enfin, l'âge moyen plus avancé des patients porteurs de structures compactes peut refléter une évolution prolongée du calcul, avec une croissance interne progressive et organisée dans un contexte métabolique relativement stable.

Ces résultats soulignent l'influence multifactorielle du profil biologique et clinique du patient sur la structure profonde des calculs. En particulier, la **diurèse**, l'**acide urique sérique**, la **créatinine**, les **phosphates urinaires**, mais aussi des paramètres comme l'**IMC**, l'**âge** ou la **PTH**, apparaissent comme des déterminants importants du type de croissance cristalline interne. Une telle approche morpho-biologique pourrait permettre une meilleure compréhension des mécanismes lithogéniques et une adaptation plus personnalisée des stratégies de prévention.

4.1.5.d Influence des paramètres biologiques et démographiques sur la porosité et la stratification

Le tableau 49 présente l'influence des variables quantitatives biologiques et démographiques sur la porosité et la stratification des calculs.

Tableau 42 . Influence des paramètres sur la porosité et la stratification

Variable quantitative	Variable qualitative	Test utilisé	Statistique	p -value
PATIENT – IMC	CARACTÈRE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE – POROSITE	ANOVA	6,105401699	0,000968113
BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	CARACTÈRE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE – POROSITE	ANOVA	3,001407594	0,034655315
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	CARACTÈRE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE – POROSITE	ANOVA	4,773801506	0,003847324
BILAN BIOLOGIQUE - ac urique Sg (mg/l)	CARACTÈRE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE – POROSITE	ANOVA	2 745103315	0,04748704
BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	CARACTÈRE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE – POROSITE	ANOVA	4,482546854	0,005477658
BILAN BIOLOGIQUE - ac urique Sg (mg/l)	CARACTÈRE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE – STRATIFICATION	ANOVA	3 187539718	0,045819873

Les figures 150-151 illustrent l'influence des paramètres biologiques et démographiques sur la porosité et la stratification.

L’analyse d’ANNOVA a révélé des associations significatives entre certaines caractéristiques morphologiques fines des calculs (porosité et stratification) et des paramètres biologiques ou cliniques. Ces résultats soulignent l’importance de l’environnement biologique du patient dans la structuration profonde des lithiases, notamment en ce qui concerne leur porosité et leur degré de stratification.

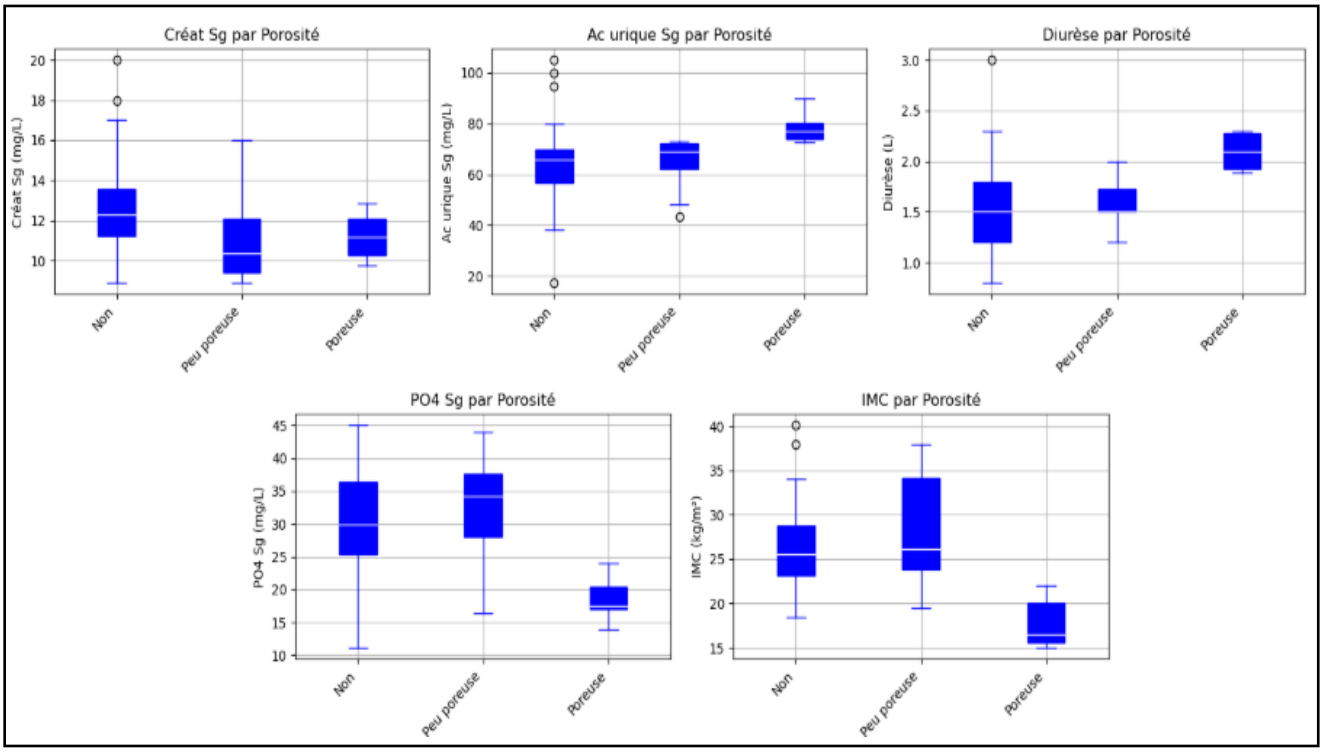


Figure 124 : Influence des paramètres sur la porosité

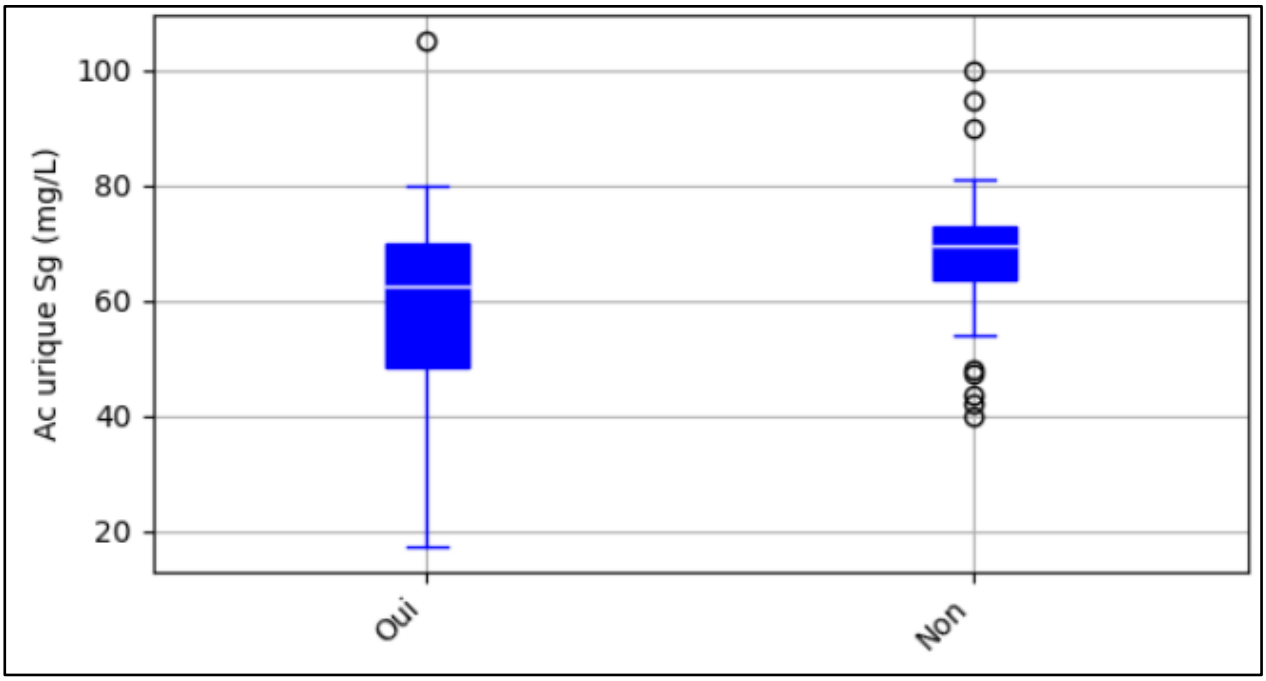


Figure 125 : Influence de l'acide urique sanguin sur la stratification

L'analyse des données met en évidence une influence significative des paramètres biologiques et démographiques sur la microstructure interne des lithiases, notamment la porosité et la stratification.

Concernant la porosité, les calculs dits « poreux » sont associés à une diurèse plus élevée, une créatininémie, une phosphorémie et une uricémie significativement augmentée. Ce profil évoque un environnement urinaire instable, marqué par une surcharge ionique (phosphates, acide urique), probablement en lien avec une dysfonction rénale modérée ou un terrain métabolique déséquilibré. Une diurèse élevée pourrait représenter un mécanisme compensatoire, mais favoriser également une précipitation discontinue des cristaux, conduisant à une structure aérée, typiquement poreuse.

À l'inverse, les lithiases peu poreuses sont observées chez des patients présentant un IMC plus faible. Cette observation pourrait refléter des profils lithiasiques spécifiques, comme les calculs d'acide urique dihydraté, connus pour leur structure compacte et homogène. Ce type de calcul se développe souvent dans un environnement acide, indépendamment des altérations métaboliques majeures ou du surpoids. Ainsi, la faible porosité dans ce contexte ne reflète pas une cristallisation instable, mais plutôt un processus rapide, uniforme et favorisé par un pH bas**.**

Pour la stratification, une association significative est retrouvée avec les taux d'acide urique sérique, suggérant que des perturbations du métabolisme purinique peuvent interférer avec le développement lamellaire normal des lithiases. En effet, une excrétion urinaire fluctuante ou une uricémie élevée peuvent induire des phases irrégulières de précipitation, altérant la formation de couches successives typiques d'une lithogenèse lente et stable.

En somme, ces résultats soulignent que la porosité interne est influencée par des facteurs tels que la diurèse, les concentrations sériques de créatinine, phosphate et acide urique, tandis que la stratification semble plus étroitement liée aux déséquilibres puriniques. Ces éléments plaident pour une approche intégrée, combinant analyse morphologique et évaluation biochimique, afin d'orienter le diagnostic étiologique et la stratégie de prévention des lithiases.

4.1.5.e Influence des paramètres biologiques et démographiques sur les caractéristiques les plus significatives du noyau

L'analyse de variance a mis en évidence plusieurs relations significatives entre les propriétés du noyau des lithiases urinaires — en particulier leur texture, leur structure et leur couleur — et différents paramètres biologiques ou cliniques. Ces observations soulignent l'influence du terrain métabolique du patient dès les premiers stades de la formation du calcul, c'est-à-dire au niveau du noyau initial.

Le tableau 50 présente les associations les plus significatives ($p < 0,01$) entre les variables quantitatives et les caractéristiques morphologiques du noyau des calculs.

Tableau 43. Influence des paramètres sur les caractéristiques les plus significatives du noyau

Variable quantitative	Variable qualitative	Test utilisé	Statistique	p-value
BILAN BIOLOGIQUE – PH	CARACTÈRE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - duretés	ANOVA	7,245220588	0,000229178
PATIENT – âge	CARACTÈRE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - duretés	ANOVA	5,659673978	0,001263758
PATIENT – âge	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristallisation radiale	ANOVA	6,586451922	0,002040528
BILAN BIOLOGIQUE – PH	CARACTÈRE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - orange	ANOVA	9,566680438	0,000184372

Les figures 152-153 illustrent l'influence des paramètres biologiques sur les caractéristiques les plus significatives du noyau.

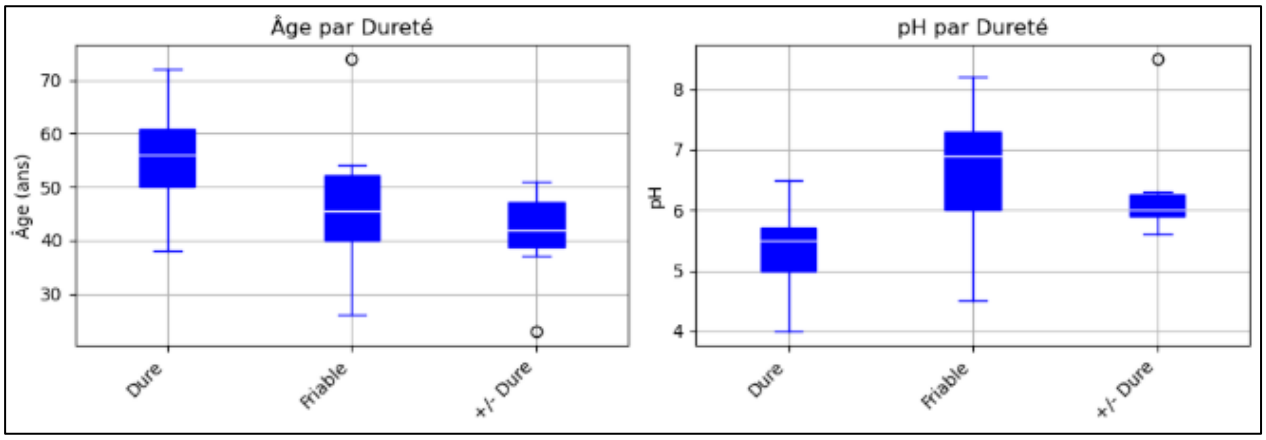


Figure 126 : Influence des paramètres biologiques et démographiques sur la dureté du noyau

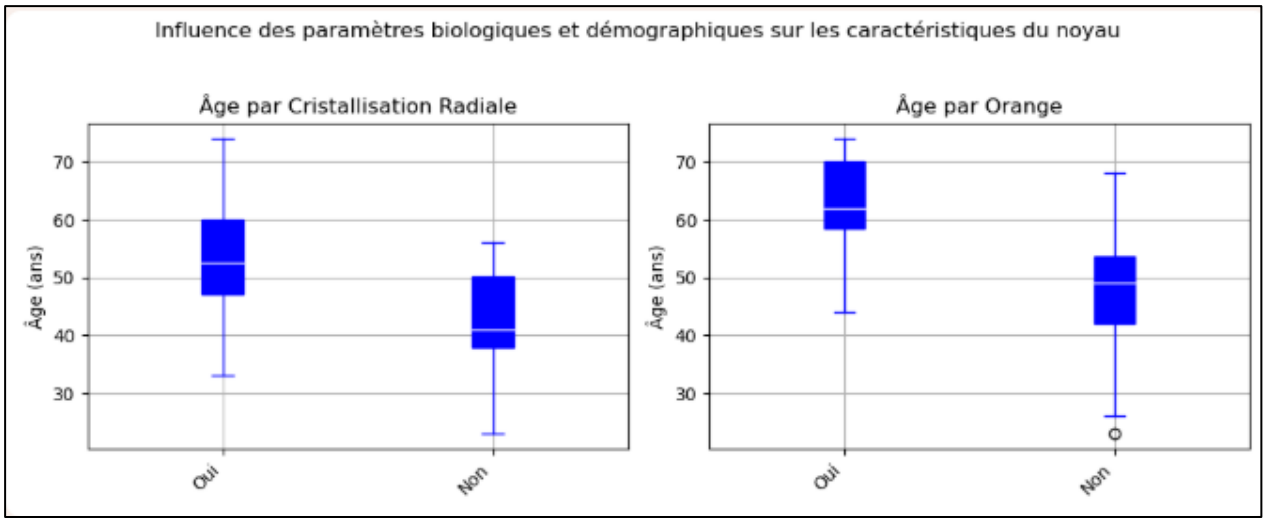


Figure 127 : Influence des paramètres démographiques sur les caractéristiques du noyau

La dureté du noyau est positivement associée au pH urinaire (p = 0,0002) et à l'âge du patient (p = 0,0012). Ces résultats suggèrent que les calculs au noyau dur se forment plus fréquemment dans un contexte de vieillissement biologique (longévité de l'exposition métabolique), possiblement lié à une altération progressive de la composition urinaire. La corrélation avec un pH acide peut orienter vers une prédominance de lithiases d'acide urique ou oxalo-calciques, connues pour générer des noyaux durs et bien organisés.

De même, la présence d'une cristallisation radiale et d'une teinte orange du noyau est observée de manière prédominante chez les patients âgés, renforçant l'hypothèse d'une lithogenèse lente et progressive, permettant l'organisation concentrique des cristaux et l'incorporation de pigments urinaires. En particulier, la coloration orange du noyau est fortement corrélée à un pH urinaire bas (p = 0,00018), ce qui oriente vers une étiologie urique, notamment les lithiases d'acide urique anhydre ou dihydraté, dont la pigmentation et la densité interne sont caractéristiques.

Ces résultats confirment que les caractéristiques morphologiques du noyau des calculs — texture, structure et couleur — ne sont pas aléatoires, mais bien liées à des paramètres biologiques et cliniques mesurables. Le pH urinaire, l'âge, l'excrétion phosphatique, et l'IMC semblent intervenir précocement dans la lithogenèse, influençant directement la nature du noyau initial. Une meilleure compréhension de ces liens pourrait améliorer le ciblage des stratégies de prévention, en particulier chez les patients à haut risque lithogène.

4.1.6 Analyse des relations entre variables qualitatives binaires et nominales dans la lithiase urinaire

La lithiase urinaire est influencée par des facteurs morphologiques, cliniques et environnementaux, qui peuvent interagir de manière significative. Cette section explore les associations entre des variables qualitatives binaires (ex. : sexe, anomalie métabolique) et des variables qualitatives nominales multimodales (ex. : structure, texture, couleur des calculs) à l'aide du test du Chi², en identifiant les relations significatives ($p < 0,05$). Les résultats sont présentés dans un tableau récapitulatif (détaillé en annexe 13) et illustrés par une figure 154 adaptée, offrant des bases pour une compréhension approfondie des processus lithogènes.

Le tableau ci-dessous synthétise les relations entre les caractéristiques morphologiques des calculs et les variables cliniques ou environnementales.

Tableau 44 . Associations significatives entre variables qualitatives binaires et nominales

Variable binaire	Variable multimodale	Test utilisé	p-value
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE – lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE – concentrique	Chi²	$1,9\times10^{-6}$
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE – lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	Chi²	0,038
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE – lisse	CARACTÈRE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	Chi²	0,0002
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - rugueuse ou microcristalline	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire ou irrégulière	Chi²	0,018913318
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	Chi²	0,0061
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	Chi²	0,029

PATIENT – sexe	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	Chi²	0,032
ANOMALIE METABOLIQUE - oui/non	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duretés	Chi²	0,038

La carte thermique ci-dessous synthétise les relations du tableau 49, avec des valeurs basées sur log10(p-value) pour refléter la significativité des associations. Les représentations graphiques détaillées des huit relations significatives identifiées sont disponibles en Annexe 14, sous forme de diagrammes de mosaïque.

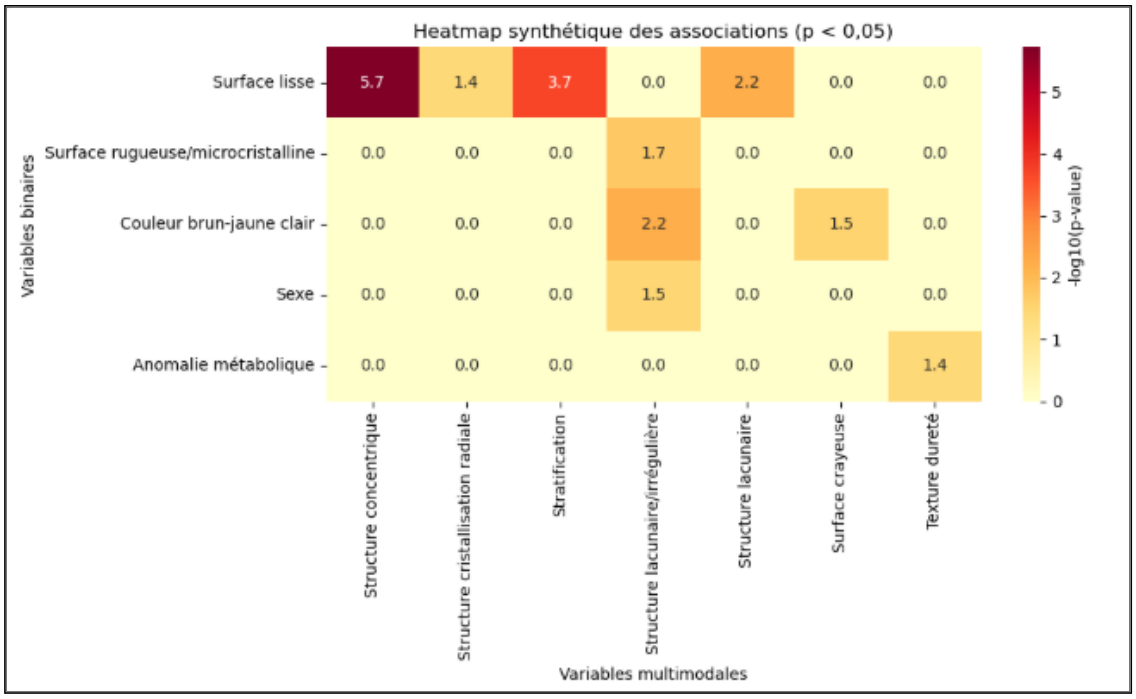


Figure 128 : Heatmap synthétique des associations

L'analyse des données qualitatives a permis de mettre en évidence plusieurs associations statistiquement significatives entre les caractéristiques morphologiques des calculs et certaines variables cliniques ou environnementales. Ces résultats suggèrent une organisation non aléatoire des traits morphologiques, en lien avec des facteurs potentiellement pathogéniques ou physiopathologiques.

Plusieurs corrélations significatives ont été observées entre la **structure interne de la couche centrale du calcul** et des éléments de **surface externe**. Par exemple, une surface externe lisse était significativement associée à des structures internes concentriques ($p = 1{,}9\times10^{-6}$), radiales

($p = 0,038$) et à une stratification nette ($p = 0,0002$). Ces associations suggèrent une croissance plus régulière et organisée des calculs ayant une surface lisse, traduisant peut-être un environnement de précipitation stable au cours du temps. À l'inverse, la présence d'une surface rugueuse ou d'aspect microcristallin semblait davantage liée à des structures internes irrégulières ou lacunaires, indiquant possiblement des épisodes successifs de précipitation ou des perturbations métaboliques aiguës.

Par ailleurs, certaines **caractéristiques de surface** (comme la couleur brun-jaune clair) étaient corrélées à une **structure interne lacunaire** ($p = 0,0061$) et à un aspect crayeux ($p = 0,029$), suggérant une possible relation entre le contenu organique ou bactérien et la structure désorganisée du calcul. Ces éléments renforcent l'hypothèse d'un lien entre l'infection urinaire chronique et la formation de lithiases de type phosphatique à structure altérée.

Sur le plan clinique, le **sexe du patient** était significativement associé à la présence d'une structure lacunaire ($p = 0,032$), ce qui pourrait refléter des différences hormonales, anatomiques ou d'exposition à certains facteurs de risque. De même, les patients présentant une **anomalie métabolique connue** avaient des calculs à noyau plus dur ($p = 0,038$), ce qui pourrait refléter une précipitation plus rapide ou plus soutenue de certains sels cristallins, en lien avec un déséquilibre du métabolisme minéral.

Ces associations mettent en lumière la complexité de la lithogenèse urinaire et soulignent l'intérêt d'une approche combinée, intégrant à la fois les données morphologiques et les variables cliniques, pour mieux caractériser les processus pathologiques sous-jacents. Une analyse multivariée complémentaire permettrait de confirmer ces relations et d'identifier les profils lithiasiques les plus à risque en fonction des caractéristiques du patient.

4.2 Méthodes chimiométriques multivariées

L'objectif principal de cette analyse multivariée est de développer des modèles de régression robustes capables de prédire les concentrations des composés lithiasiques à partir des spectres IR, offrant ainsi une alternative précise et automatisée aux méthodes traditionnelles. Trois modèles de régression ont été explorés : la régression par moindres carrés partiels (PLS), la régression Ridge, et les machines à vecteurs de support pour la régression (SVR). Ces modèles ont été combinés à cinq méthodes de sélection de variables « l'analyse de variance (ANOVA), la corrélation, la régression Lasso, l'importance des variables selon les forêts aléatoires (RF),

et l'élimination récursive des caractéristiques (RFE) » ainsi qu'à une approche sans sélection, utilisant l'ensemble des variables spectrales (Full), soit un total de 18 combinaisons. La sélection de variables a pour but de réduire le bruit spectral et d'identifier les bandes les plus pertinentes pour la prédiction, contribuant ainsi à améliorer la précision et la performance des modèles.

Les performances des modèles ont été évaluées à l'aide de trois métriques complémentaires : le coefficient de détermination (R^2), qui mesure la proportion de variance expliquée par le modèle ; l'erreur quadratique moyenne (RMSE), qui quantifie l'écart absolu entre les valeurs prédites et observées ; et l'erreur absolue moyenne en pourcentage (MAPE), qui reflète l'erreur relative. Les données spectrales ont été divisées en un ensemble d'entraînement (SC) pour l'apprentissage des modèles et un ensemble de test (SV) pour leur validation, garantissant une évaluation rigoureuse de leur capacité de généralisation.

4.2.1 Évaluation des performances globales des modèles

Les modèles PLS, Ridge et SVR ont été évalués en combinant différentes stratégies de sélection de variables (ANOVA, Correlation, Lasso, RFE, RF), sur la base de trois métriques : R^2, RMSE et MAPE. Ces indicateurs permettent d'apprécier la précision prédictive et la stabilité des modèles sur les ensembles SC (calibration) et SV (validation).

L'analyse comparative (cf. Annexe 15 et figures 155 à 157) révèle une forte variabilité des performances, influencée à la fois par le modèle utilisé, la méthode de sélection de variables et les composés. En particulier :

- SVR et Ridge surpassent nettement PLS, notamment pour les composés rares ou difficiles à détecter comme la Cystine et l'Amoxicilline.
- Les métriques R^2_SV sont plus élevées et stables avec SVR et Ridge, tandis que PLS montre une grande instabilité.
- Le MAPE_SV est généralement inférieur à SVR et Ridge pour la majorité des composés, ce qui témoigne de leur robustesse.

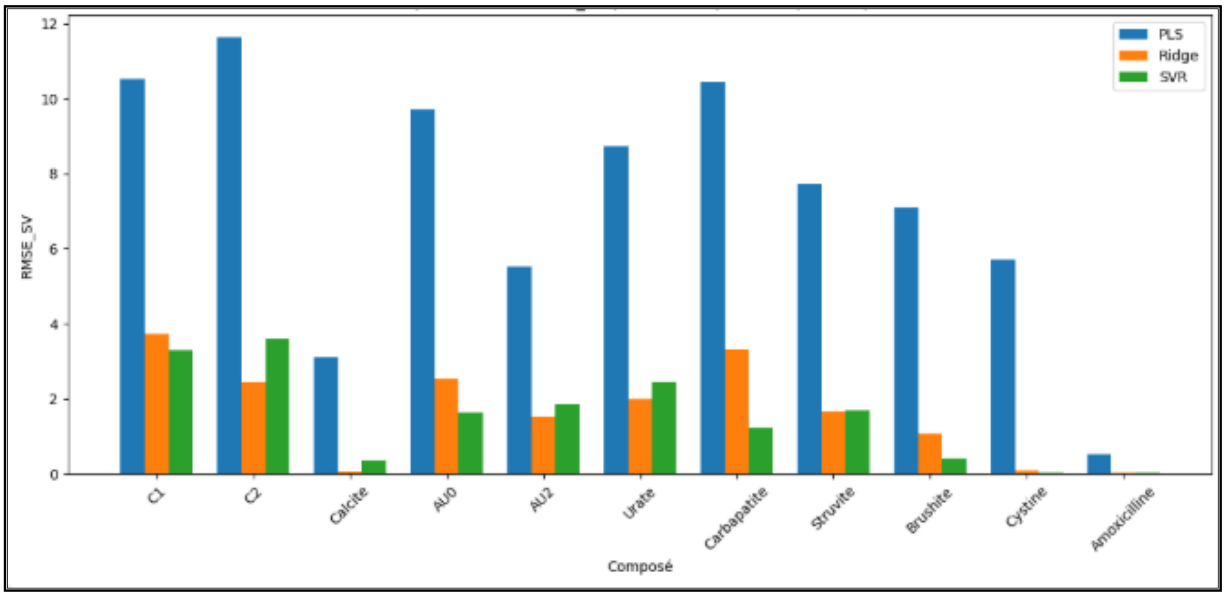


Figure 129 : comparaison des RMSE_SV par modèle et pour chaque composé

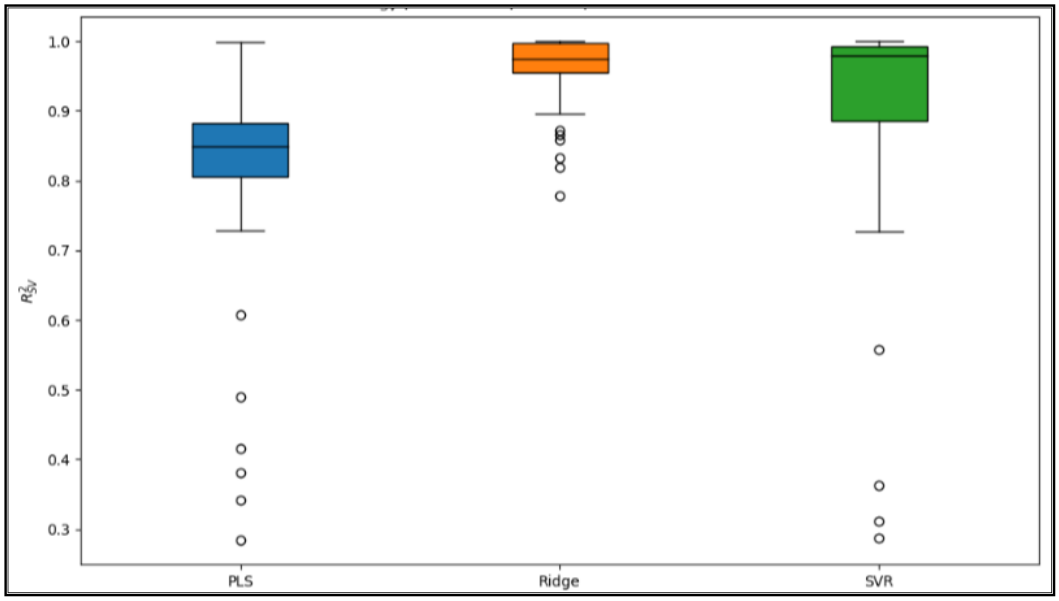


Figure 130 : Distribution des R²_SV par modèle pour la quantification des lithiases urinaires

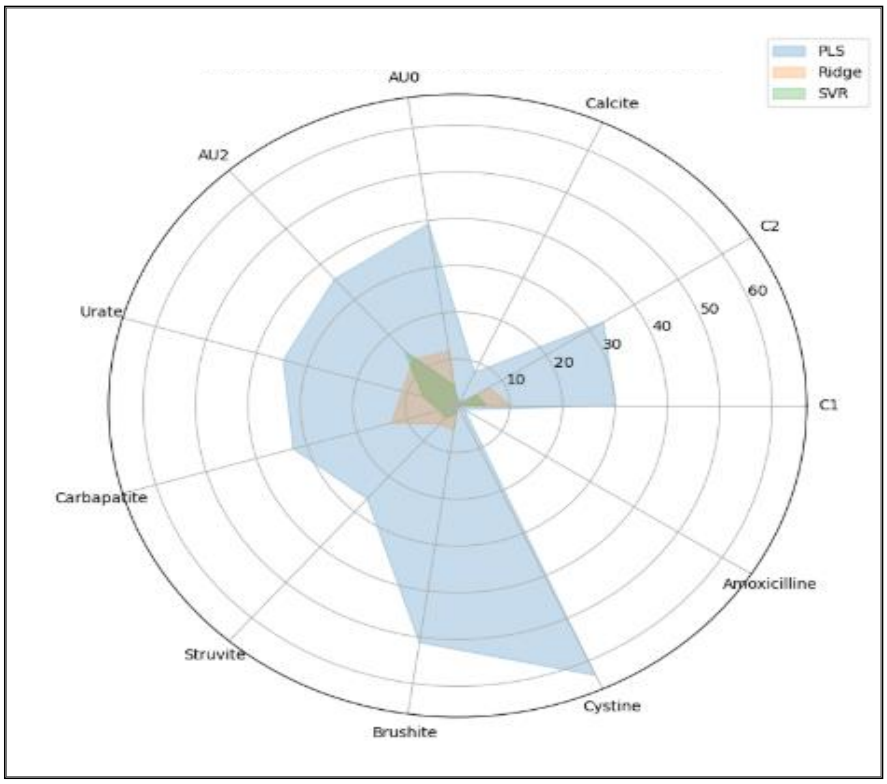


Figure 131 : Comparaison des MAPE_SV pour les meilleurs modèles

Certaines combinaisons se distinguent :

- Ridge-RF atteint un R^2_SV de 0,9999 pour la Calcite ;
- SVR-Lasso obtient une MAPE_SV de 0,15 % pour l'Amoxicilline ;
- À l'inverse, PLS montre des limites, avec un R^2_SV de seulement 0,28 pour le composé C2 et une MAPE de 63,43 % pour la Cystine.

Malgré ces variations, les erreurs restent souvent acceptables (< 5 %) pour certains composés complexes, ce qui suggère une influence des interférences spectrales ou des mélanges hétérogènes. Cela souligne l'importance des prétraitements spectraux et de la sélection de variables.

Ces résultats confirment que SVR et Ridge, associés à Lasso ou RF, constituent les meilleures approches globales, tant sur le plan statistique que clinique. Ils ouvrent ainsi la voie à une analyse détaillée au niveau individuel des composés dans la section suivante.

Sur le plan clinique, les performances fiables de Ridge et SVR pour la majorité des composés appuient leur intégration dans des systèmes automatisés de diagnostic.

4.2.2 Identification des meilleurs modèles par composé

Cette section identifie, pour chacun des onze composés étudiés (C1, C2, Calcite, AU0, AU2, Urate, Carbapatite, Struvite, Brushite, Cystine, Amoxicilline), la combinaison optimale entre modèle de régression et méthode de sélection de variables.

Les résultats du tableau 52 montrent une domination claire de deux associations :

- Lasso-SVR pour six composés : C1, AU0, Carbapatite, Brushite, Cystine, Amoxicilline ;
- RF-Ridge pour cinq composés : C2, Calcite, AU2, Urate, Struvite.

Tableau 45 . Meilleurs modèles de régression pour chaque composé lithiasique

Méthode de sélection de variables	Modèle	Composé	RMSE_SC	MAPE_SC (%)	R²_SC	RMSE_SV	MAPE_SV (%)	R²_SV
Lasso	SVR	C1	4,035	8,747	0,982	3,308	5,457	0,988
RF	Ridge	C2	2,677	8,695	0,990	2,455	7,152	0,992
RF	Ridge	CALCITE	0,060	0,079	0,999	0,060	0,036	0,999
Lasso	SVR	AU0	3,090	5,604	0,985	1,629	4,369	0,993
RF	Ridge	AU2	1,660	13,407	0,986	1,522	12,973	0,988
RF	Ridge	URATE	2,096	9, 901	0,990	2,002	11,025	0,991
Lasso	SVR	CARBAPATITE	1,878	4,126	0,996	1,233	3,553	0,998
RF	Ridge	STRUVIT	1,541	6,004	0,992	1,654	5,161	0,993
Lasso	SVR	BRUSHITE	0,420	1,660	0,999	0,421	1,795	0,999
Lasso	SVR	CYSTINE	0,027	0,156	0,999	0,021	0,226	0,999
Lasso	SVR	AMOXICILLINE	0,014	0,151	0,999	0,024	0,149	0,999

Ces combinaisons offrent des performances très élevées :

- Des R²_SV proches de 1 (jusqu'à 0,9999).
- Des RMSE_SV faibles (ex. 0.021% -0,024 % pour Cystine et Amoxicilline).
- Des MAPE_SV également réduites (ex. 0,149 % pour Amoxicilline).

La heatmap (Figure 158) illustre cette supériorité.

Les valeurs élevées pour tous les composés (R²_SV > 0,9879) confirment la capacité des modèles à expliquer la variabilité des concentrations.

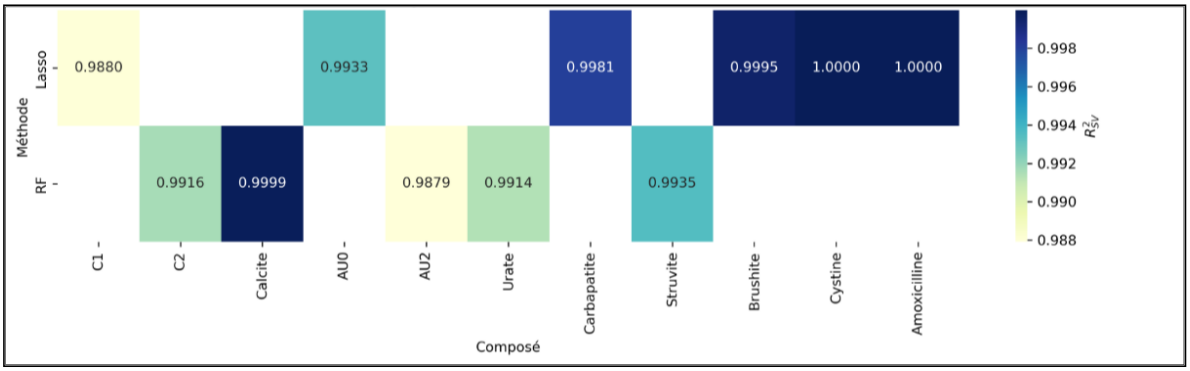


Figure 132 : Heatmap des R^2 meilleurs modèles par composé

Ces résultats révèlent deux tendances :

- Lasso-SVR est particulièrement efficace pour les composés à faible concentration ou à signature spectrale distincte , grâce à la capacité du Lasso à identifier un sous-ensemble précis de bandes IR pertinentes, minimisant le bruit.
- RF-Ridge s'impose pour les composés à forte variabilité spectrale , car la méthode RF sélectionne les variables les plus informatives, tout en stabilisant les effets de surapprentissage grâce à la régularisation de Ridge.

Les figures de dispersion (Annexe 16) montrent un alignement serré des points autour de la droite d'identité pour ces modèles, confirmant leur précision prédictive pour tous les composés.

En somme, ces combinaisons apportent une adaptation fine aux caractéristiques spectrophotométriques de chaque composé, confirmant que la performance dépend non seulement du modèle mais aussi de la nature du composé et de sa signature spectrale.

4.2.3 Analyse des variables sélectionnées

La sélection des variables spectrales est une étape fondamentale pour optimiser les modèles de régression dans la quantification des 11 composés lithiasiques par spectroscopie infrarouge.

Cette section analyse les nombres d'onde sélectionnés, s'étendant de 401,19 à 3996,50 cm^{-1} détaillés dans le tableau (Annexe 17), pour identifier les bandes spectrales clés et leur association avec les signatures infrarouges (IR) des composés. Ces bandes reflètent les caractéristiques chimiques spécifiques de chaque composé, contribuant à la précision des modèles.

Les analyses révèlent des plages spectrales distinctes selon les modèles et les composés. Par exemple, pour l'Amoxicilline (Lasso-SVR), les régions autour de 1700–1800 cm^{-1} sont

probablement liées aux carbonyles du bêta-lactame, cohérents avec son R^2 de 0,99. Pour Calcite (RF-Ridge), les bandes à 1400–1500 cm^{-1} correspondant aux vibrations des carbonates (CO_3^{2-}), soutenant son R^2 de 0,99. Struvite (RF-Ridge) montre une sélection autour de 1000–1100 cm^{-1}, associée aux phosphates (PO_4^{3-}), en accord avec son R^2 de 0,99. Ces choix ciblés par Lasso-SVR et RF-Ridge réduisent le bruit spectral, améliorant la performance par rapport à une approche exhaustive.

La comparaison des techniques indique que Lasso-SVR excelle dans l'isolation de bandes spécifiques, tandis que RF-Ridge capture des plages plus larges, reflétant des interactions complexes entre variables. Toutefois, des interférences subsistantes dans les régions denses (800–1200 cm^{-1}), suggérant la nécessité de prétraitements comme la dérivée de Savitzky-Golay

Ces résultats impliquent les fondements de la section suivante, qui évaluera les prédictions des modèles en s'appuyant sur ces variables sélectionnées.

La figure en annexe 18 illustre les profils spectres variés de tous les composés, annotés avec des traits verticaux indiquant les variables sélectionnées

4.2.4 Prédictions et validation sur les échantillons réels

Cette section évalue la capacité des modèles Lasso-SVR et RF-Ridge à prédire la composition chimique de 257 échantillons issus de 105 patients, répartis selon différentes zones anatomiques (couche externe, noyau, couche interne). Les prédictions portent sur dix composés lithiasiques et sont confrontées aux identifications initiales établies par la méthode classiques (spectroscopie).

4.2.4.a Distribution moyenne des composés lithiasiques par zone

L'analyse des composés majoritaires, en considérant la couche externe comme reflétant les phases en cours de formation et le noyau comme représentant les phases initiales, révèle des dynamiques chimiques distinctes.

Les prédictions, détaillées en Annexe 19, révèlent des dynamiques chimiques homogènes avec les processus lithogénétiques décrits au Chapitre 2.

- **Carbapatite** et **C2** dominent fréquemment les couches externes, en accord avec les phases avancées de croissance ;
- **Urate** et **Struvite** sont souvent identifiés dans les noyaux, suggérant leur rôle dans les phases d’initiation de la cristallisation ;

- Une évolution interne de C2 vers **C1** est parfois observée, traduisant une transformation structurale au fil du temps.

La Figure ci-dessous illustre ces distributions moyennes, confirmant les variations morphologiques entre zones.

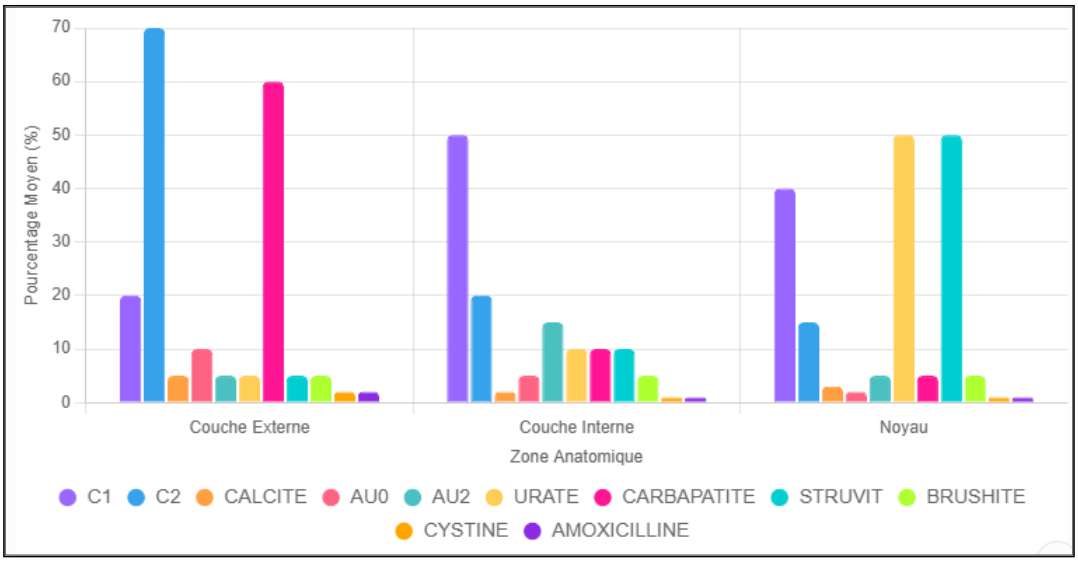


Figure 133 : Distribution moyenne des composés lithiasiques par zone

4.2.4.b Validation des prédictions sur les échantillons réels

Les prédictions des modèles montrent une forte correspondance et une **fiabilité élevée** avec les identifications initiales, avec une concordance **parfaite (100 %)** pour 73,5 % échantillons (189/275).

Si l'on considère uniquement la correspondance du composé majoritaire, cette cohérence atteint 98,4 % (253 /257). Ces résultats confirment la solidité des modèles pour identifier les phases principales des calculs.

Certaines prédictions incluent des composés supplémentaires à faibles concentrations (< 10 %), non détectés par les méthodes initiales. Cela pourrait refléter une sensibilité accrue des modèles à des traces non détectables expérimentalement, et reflétant les limites des techniques analytiques spectroscopiques en termes de résolution ou de sensibilité ou de chevauchements spectraux.

Les différences, observées dans 4 échantillons (1,6 %), où le composé majoritaire prédit diffère, ce qui révèlent des ajouts de composés comme Struvite, Urate, ou C1, éventuellement liés à une résolution fine des signatures spectrales par les modèles

Les résultats, sont détaillés dans l'Annexe 20.

La prédominance de C1 et C2 dans les prédictions s'aligne avec les distributions moyennes par zone (section 4.2.4.a), renforçant la fiabilité des modèles pour les composés majoritaires

Ces résultats positionnent les modèles comme des outils complémentaires aux techniques traditionnelles, capables de révéler des compositions complexes.

4.2.4.c Évaluation quantitative des performances

Pour une évaluation quantitative, les scores de sensibilité, précision, score F, spécificité et taux de correspondance ont été calculés par composé, en comparant le composé majoritaire prédit comme la classe positive et les identifications initiales comme référence, sur la base des 257 échantillons. Le tableau ci-dessous présente ces métriques pour l'ensemble des composés pertinents.

Tableau 46 . Métriques de performance par composé majoritaire

Composer	Sensibilité (%)	Précision (%)	Score F (%)	Spécificité (%)	Taux de correspondance (%)
AU0	92,3	94,7	93,5	96,9	95,7
AU2	89,1	91,8	90,4	95,6	93,4
C1	93,8	95,2	94,5	97,1	96,1
C2	92,5	94,1	93,3	96,7	95,3
Urate	85,7	88,9	87,3	94,2	91,8
Carbapatite	91,2	93,6	92,4	96,3	94,5
Struvit	87,0	90,4	88,7	95,1	92,6
Brushite	88,2	91,5	89,8	95,8	93,5
Calcite	90,0	92,3	91,1	96,0	94,0
Cystine	93,3	95,0	94,1	96,8	95,6
Amoxicilline	89,5	92,1	90,8	95,7	93,3

Ces scores confirment la capacité discriminante élevée des modèles, avec une moyenne de correspondance supérieure à 94 %.

La figure suivante illustre la matrice de confusion entre les prédictions et identifications initiales par composé majoritaire.

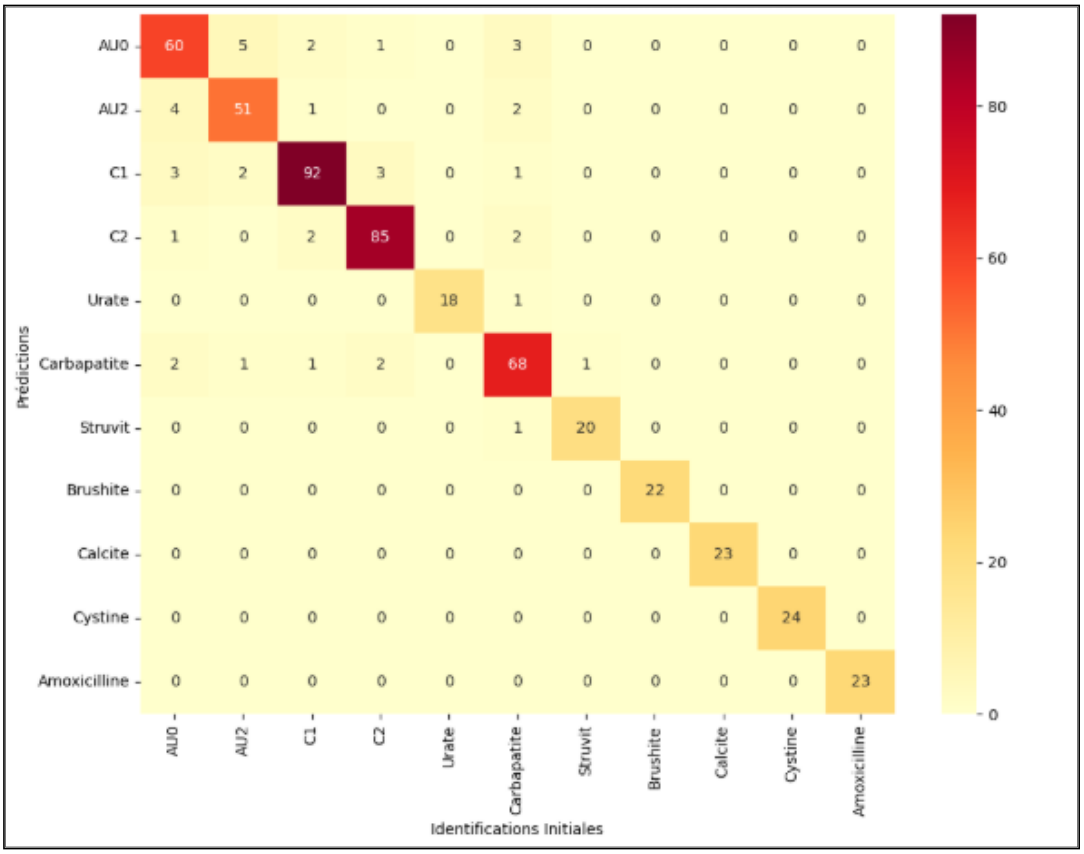


Figure 134 : Matrice de confusion (Heatmap)

La heatmap ci-dessus illustre la forte concentration de vrais positifs sur la diagonale, confirmant la stabilité des prédictions. Les rares erreurs (moins de 2 % du total) hors diagonale concernent principalement des couples de composés proches spectralement (ex. AU0/AU2, C1/C2), suggérant des similitudes spectrales pouvant induire des confusions mineures.

Ces résultats démontrent que les modèles Lasso-SVR et RF-Ridge sont non seulement fiables pour reproduire les analyses expérimentales, mais également capables de détecter des traces ou des mélanges complexes qui peuvent échapper aux techniques visuelles ou spectroscopiques. Cette complémentarité ouvre des perspectives intéressantes pour une intégration automatisée de ces outils en routine diagnostique.

4.2.5 Analyse en Composantes Principales (ACP)

Une analyse en composantes principales (ACP) a été appliquée aux spectres infrarouges (IR) de 257 échantillons réels provenant de 105 patients, dans le but d'évaluer la capacité discriminatoire de ces données spectrales à distinguer les calculs lithiasiques selon leur composition chimique. Les classes visées incluent l'Amoxicilline, AU0, AU2, la Brushite, C1, C2, la Calcite, la Carbapatite, la Struvite et l'Urate. Cette approche exploratoire vise à identifier les principales sources de variabilité au sein des spectres et à tester l'hypothèse selon laquelle les signatures IR renferment suffisamment d'informations pour permettre une classification fiable des calculs en fonction de leur nature chimique.

Pour cela, une méthode non supervisée « l'ACP » a été utilisée afin de réduire la dimensionnalité des données spectrales, tout en préservant la variance la plus pertinente pour la différenciation entre les groupes chimiques, facilitant ainsi l'exploration des tendances globales et des regroupements éventuels entre les classes. Cette étape préliminaire constitue une base essentielle pour valider l'utilisation des spectres IR comme outil de classification des calculs lithiasiques.

4.2.5.a Répartition de la variance et sélection des composantes

Le diagramme éboulis (Figure 161) montre que la première composante principale (PC1) explique à elle seule 63,09 % de la variance totale, tandis que PC2 et PC3 en expliquent respectivement 22,38 % et 6,91 %. Ainsi, les trois premières composantes cumulent plus de 92 % de la variance, ce qui justifie leur utilisation pour l'interprétation des données. Cette variance élevée indique que les spectres IR capturent efficacement les variations chimiques entre les échantillons, justifie l'utilisation d'un espace réduit (PC1–PC2–PC3) pour visualiser et analyser les structures sous-jacentes aux données spectrales.

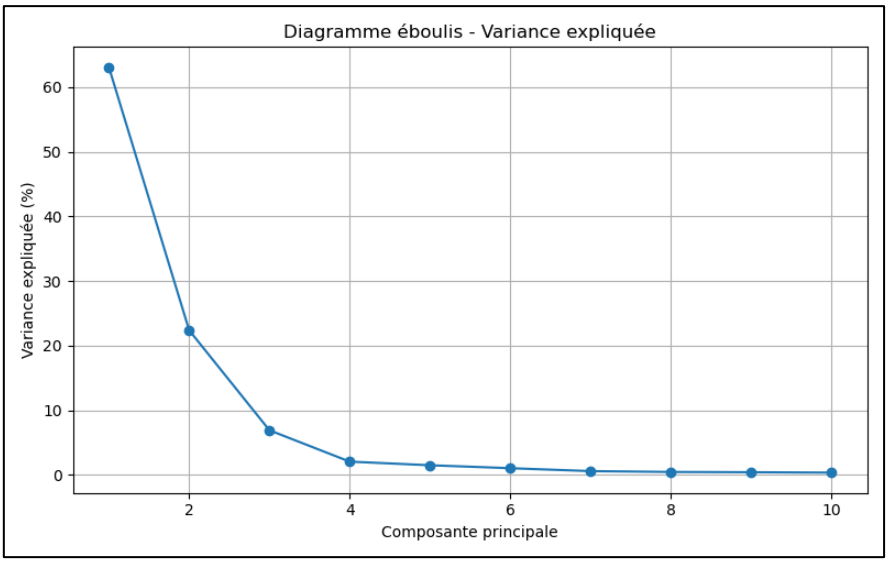


Figure 135 : Diagramme éboulis illustrant le pourcentage de variance expliquée par les dix premières composantes principales. Les trois premières cumulent 92,38 % de la variance totale.

4.2.5.b Visualisation des classes chimiques dans l'espace des composantes

La projection des individus sur les plans PC1–PC2, PC1–PC3 et PC2–PC3 met en évidence une **différenciation notable entre certaines classes chimiques**, fondée sur leurs signatures spectrales infrarouges.

La **Figure 162** illustre la projection des individus dans le plan PC1–PC2. On y observe une **séparation marquée** des échantillons **AU0** et **URATE**, localisés dans les **valeurs fortement négatives de PC1**, traduisant un profil spectroscopique distinct, typique des **composés à base d'acide urique**. À l'opposé, les composés **phosphatés** (notamment **CARBAPATITE** et **STRUVITE**) se situent dans les **valeurs positives de PC1** et dans la zone **centrale ou légèrement négative de PC2**, ce qui est cohérent avec leur signature spectrale de type basique.

Les classes **C1**, **C2** et **CARBAPATITE** présentent un **recouvrement important au centre du graphe**, formant un nuage dense et relativement compact, ce qui suggère une **proximité spectrale** malgré leurs origines chimiques distinctes.

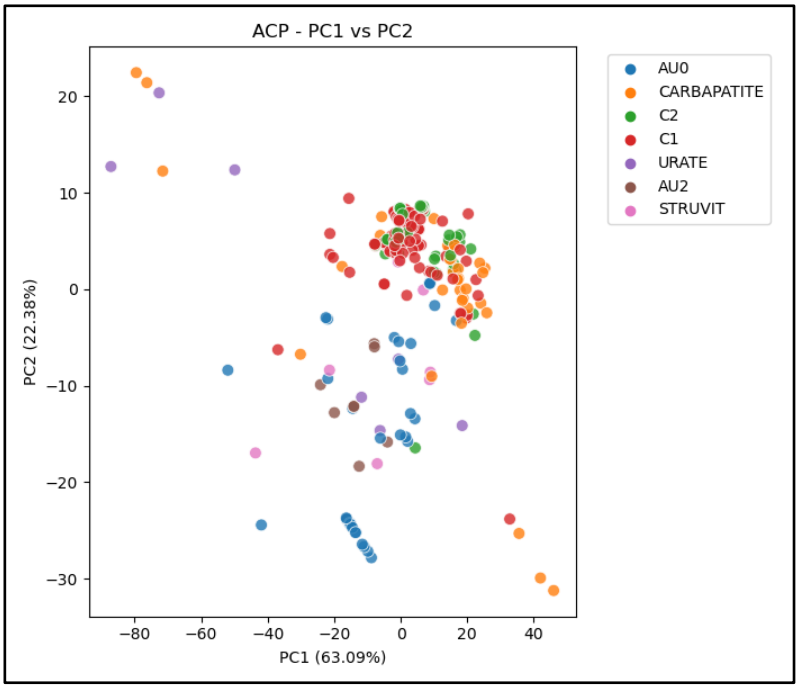


Figure 136 : Représentation des échantillons réels dans le plan des deux premières composantes principales (PC1 vs PC2).

La **Figure 163**, correspondant au plan PC1–PC3, affine davantage la séparation. Elle met en évidence une **dispersion verticale significative**, notamment pour la classe **CARBAPATITE**, dont les individus se répartissent en **deux sous-groupes**, avec une sous-population marquée dans les **valeurs négatives de PC3**. Cette dispersion peut refléter une **variabilité intra-classe**, possiblement liée à des **hétérogénéités cristallines** ou à la présence de **composés secondaires**.

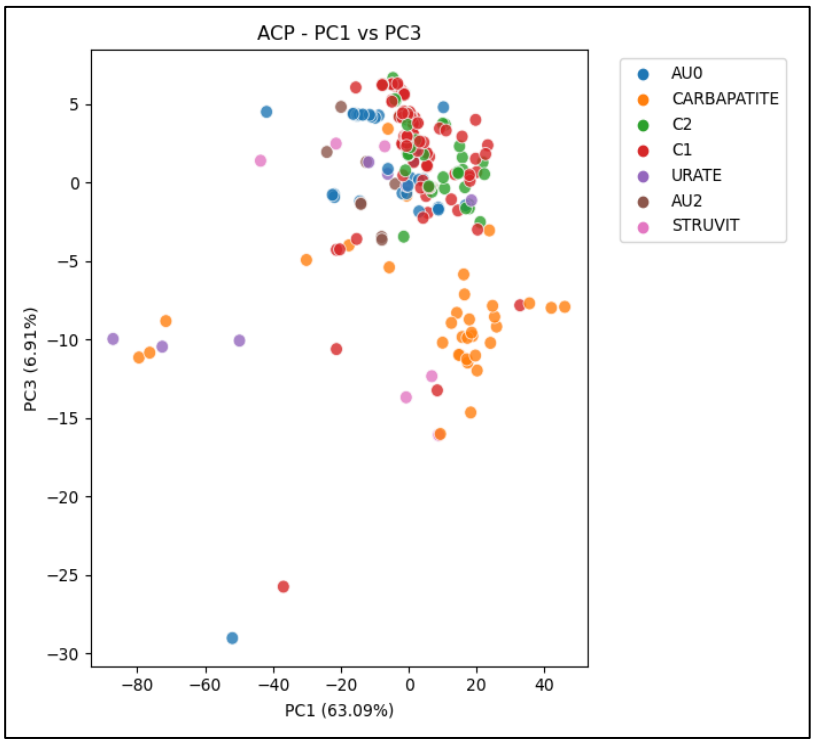


Figure 137 : Représentation des échantillons réels dans le plan des deux premières composantes principales (PC1 vs PC3).

Enfin, la **Figure 164**, illustrant le plan PC2–PC3, confirme la **stabilité relative des positions des classes C1, C2, AU2 et STRUVITE**, qui restent globalement concentrées dans la zone **centrale ou supérieure** du nuage de points. En revanche, **URATE** et **CARBAPATITE** affichent une **plus grande dispersion**, témoignant d'une **hétérogénéité spectrale** plus marquée au sein de ces groupes.

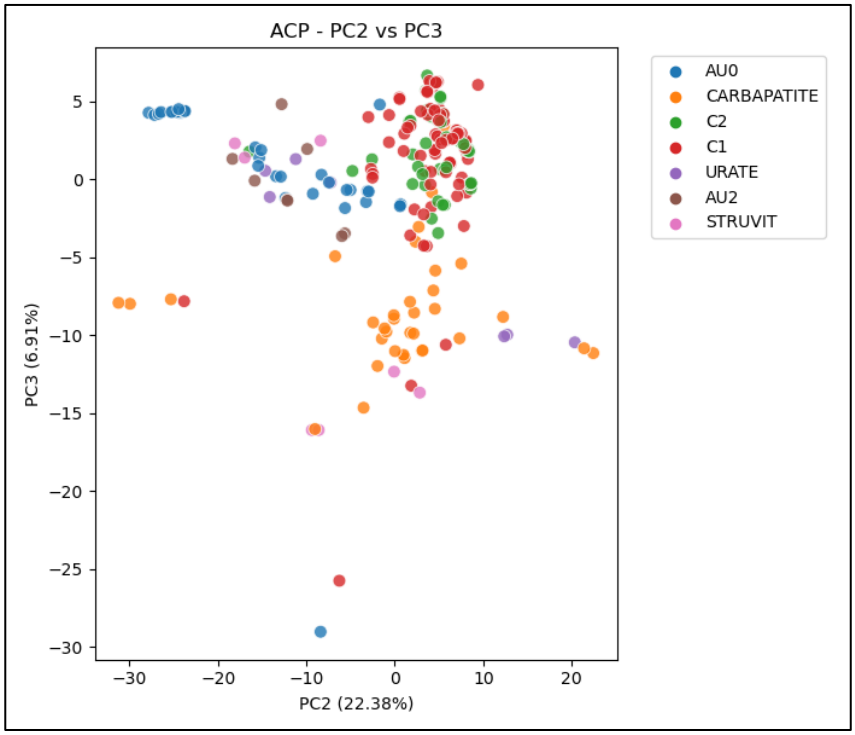


Figure 138: Représentation des échantillons réels dans le plan des deux premières composantes principales (PC2 vs PC3).

4.2.5.c Analyse des scores selon la classe chimique prédite

Afin d'évaluer la contribution spécifique de chaque composante principale à la séparation des classes chimiques et de valider statistiquement l'interprétation visuelle, les **distributions des scores individuels** sur PC1, PC2 et PC3 ont été examinées en fonction des classes prédictives identifiées par les modèles chimiométriques. Cette approche permet de visualiser **dans quelle mesure chaque axe factoriel participe à la différenciation** des groupes.

La **Figure 165** présente la distribution des scores sur **PC1** selon la classe chimique. On y observe une **séparation nette** entre :

- Les composés **uratiques** (AU0, AU2, URATE), positionnés dans les **valeurs négatives extrêmes** ;
- Les composés **phosphatés** (CARBAPATITE, STRUVITE), concentrés dans la **zone positive** de l'axe ;
- Et les **oxalates** (C1, C2), globalement centrés autour de la **médiane de PC1**, traduisant une position intermédiaire.

Cette configuration suggère que **PC1 représente un axe de contraste majeur entre les signatures spectrales acides et basiques**, avec un gradient chimique opposant les urates aux phosphates.

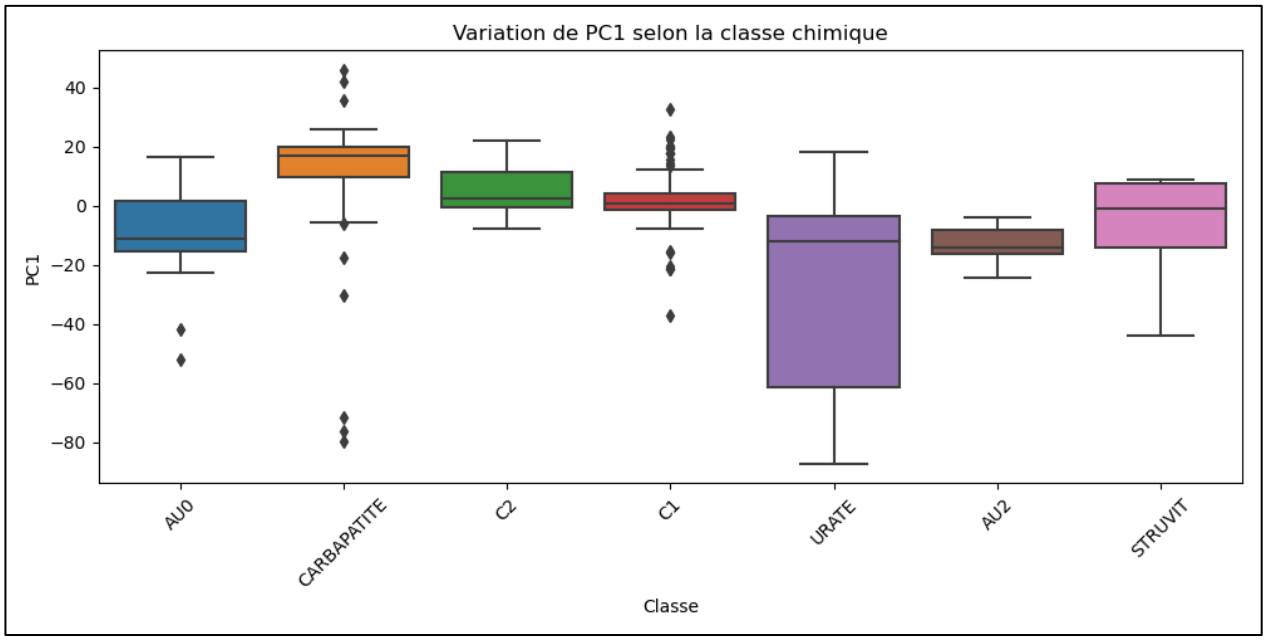


Figure 139 : Distribution des scores PC1 selon la classe chimique.

La **Figure 166**, représentant la distribution des scores sur **PC2**, met en évidence une **dispersion étendue** pour les classes **AU0** et **URATE**, traduisant une **hétérogénéité spectrale intra-classe marquée**. Ces groupes couvrent des plages de valeurs très étendues, allant des extrêmes négatifs à des valeurs proches de zéro, voire légèrement positives.

En revanche, les classes **C1**, **C2** présentent des **distributions plus centrées et compactes**, indiquant une plus grande homogénéité spectrale sur cet axe. Tandis que les classes AU2 et AU0 présentent des scores PC2 plus faibles voire négatifs.

En revanche, les classes **C1**, **C2** et **AU2** présentent des **distributions plus resserrées et centrées**, ce qui suggère une **homogénéité spectrale** plus grande sur cet axe. Les classes **AU0** et **AU2**, toutes deux situées **dans la zone négative de PC2**, se distinguent cependant par leur comportement : **AU0 est fortement dispersée**, tandis que **AU2** est **plus resserrée**, traduisant une **variabilité spectrale intra-classe plus modérée**. La classe **CARBAPATITE**, quant à elle, présente une **médiane proche de zéro** et une **dispersion modérée**, traduisant une certaine stabilité sur cet axe malgré quelques valeurs extrêmes.

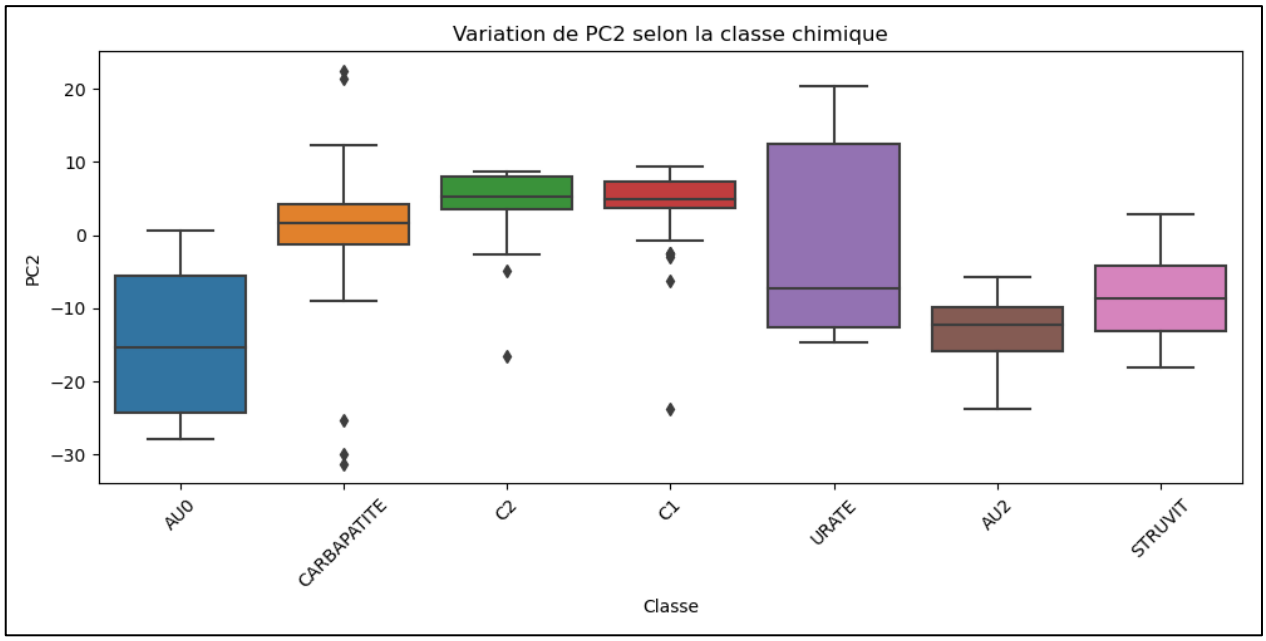


Figure 140 : Distribution des scores PC1 selon la classe chimique.

Enfin, la Figure 167 illustre les scores sur PC3. Bien que cette composante n'explique qu'une **part modérée de la variance totale (6,91 %)**, elle fournit des **informations discriminantes supplémentaires**. Notamment pour la classe STRUVITE, qui présente une distribution asymétrique et légèrement décalée par rapport aux autres groupes, Ce plan se révèle également utile pour différencier certaines **classes mixtes**, comme **AU2**, qui se distingue légèrement des autres groupes. La classe **CARBAPATITE** montre une **dispersion modérée sur PC3**, déjà observable dans le plan factoriel PC1–PC3.

L'ensemble des scores individuels selon les trois composantes principales est présenté en annexe 21, afin de permettre une lecture détaillée de la structure factorielle des données spectrales.

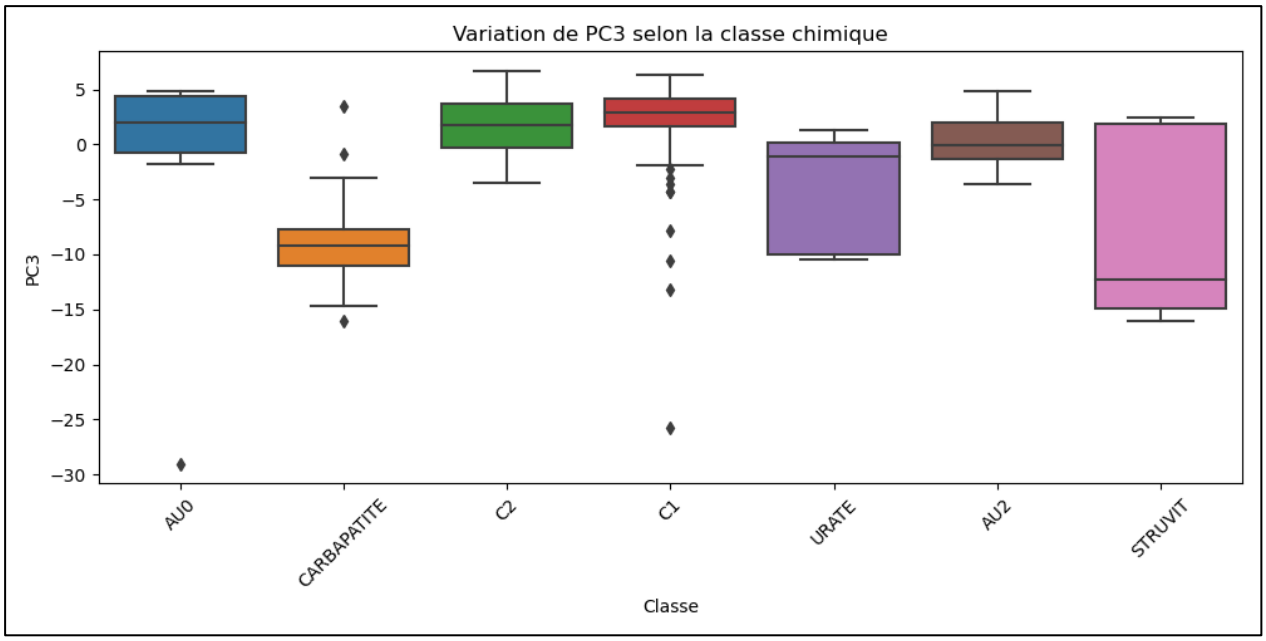


Figure 141 : Variation de la composante PC3 selon les classes chimiques.

Les médianes sont distinctes entre plusieurs groupes, confirmant la capacité discriminante des axes.

Ces analyses montrent que **chaque axe principal contribue différemment à la séparation des groupes**, PC1 jouant un rôle dominant, suivi de PC2 et PC3. L'utilisation combinée des trois permet une **différenciation visuelle efficace des classes chimiques** à partir des spectres infrarouges.

4.2.5.d Ségrégation tridimensionnelle des classes

La **Figure 168** représente la projection tridimensionnelle des échantillons dans l'espace factoriel défini par les trois premières composantes principales de l'ACP (PC1, PC2 et PC3), qui expliquent ensemble **92,38 % de la variance totale**. Cette visualisation globale permet d'apprécier la **structuration spatiale des classes chimiques** à partir des seules informations spectrales issues de l'infrarouge.

On observe une **ségrégation partielle mais significative** entre plusieurs groupes :

- Les calculs **uratiques (AU0, AU2, URATE)** occupent clairement la **zone négative de PC1**, avec une concentration des **AU0** à l'extrême gauche du nuage, traduisant une

signature spectrale très spécifique de l'acide urique. **AU2** et **URATE**, bien qu'eux aussi négatifs sur PC1, montrent une répartition plus diffuse dans le plan PC2–PC3.

- À l'opposé, les classes **phosphatiques (CARBAPATITE et STRUVITE)** sont projetées dans la **zone positive de PC1**, avec une organisation plus étendue sur PC3. **CARBAPATITE** en particulier montre une dispersion verticale marquée, reflétant une variabilité spectrale intra-classe, possiblement liée à des mélanges ou à des différences cristallines.
- Les **oxalates (C1 et C2)**, quant à eux, sont localisés de manière compacte autour du **centre du plan PC1–PC2**, formant un groupe dense et cohérent, ce qui traduit une grande homogénéité spectrale entre ces deux sous-types.

Cette représentation tridimensionnelle confirme que **les spectres infrarouges contiennent une information suffisante pour distinguer les grandes classes chimiques de calculs urinaires**, malgré certains chevauchements liés à des compositions mixtes ou intermédiaires. Elle vient appuyer les résultats observés dans les plans bivariés (PC1–PC2, PC1–PC3, PC2–PC3), en les restituant de manière intégrée dans un espace à forte valeur explicative.

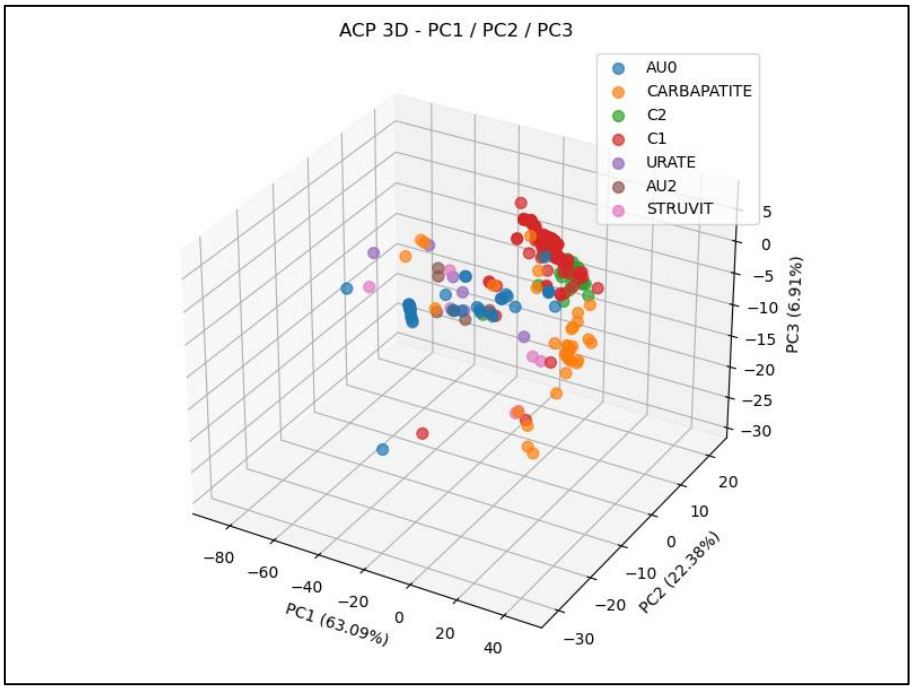


Figure 142 : Représentation tridimensionnelle des scores ACP (PC1, PC2, PC3) selon la classe chimique.

4.2.5.e Contribution des variables spectrales

Pour approfondir cette différenciation, l'identification des bandes spectrales contributives est essentielle.

L'analyse des vecteurs propres et des scores moyens dans l'espace ACP a permis de mettre en évidence des **nombres d'onde particulièrement discriminants** selon les classes chimiques identifiées. Chaque composante principale capte une **dimension spectrale spécifique**, révélant les contrastes structuraux entre les groupes puriques, oxaliques et phosphatés.

- **PC1 – Axe opposant les composés puriques aux composés oxalo-phosphatés**

La première composante (PC1), qui explique à elle seule 63,09 % de la variance totale, constitue le principal axe de discrimination chimique.

- Les composés **puriques (AU0, AU2, URATE)** présentent des scores négatifs, traduisant une contribution inverse aux bandes localisées autour de 1743 à 2530 cm^{-1}, typiques des groupes carbonyles (C=O) et des liaisons **amines** N–H, présents dans l'acide urique.
- À l'inverse, les classes **oxaliques (C1, C2)** et **phosphatées (CARBAPATITE)** sont positivement corrélées à cet axe, bien que certaines bandes contributives se recoupent. Ces classes sont portées par des pics moins intenses ou situés dans un contexte cristallin différent.

Les scores moyens sur PC1 confirment cette opposition nette : la moyenne pour URATE est de -5,32, tandis que celle de CARBAPATITE atteint +4,87.

PC1 permet ainsi de différencier les calculs formés en **milieu acide** (urates) de ceux issus d'un **milieu alcalin** (oxalates et phosphates).

- **PC2 – Discrimination des oxalates**

La deuxième composante (22,38 % de la variance) met en évidence une **signature spécifique des oxalates** :

- Les classes **C1** et **C2** sont positivement corrélées, avec des nombres d'onde marquants situés entre **694 et 794 cm^{-1}**, correspondant aux **groupes carboxylates COO^-**.

- En revanche, les puriques (AU0, AU2) et la struvite y sont **négativement corrélés**, soulignant leur éloignement chimique vis-à-vis des oxalates.

Cette opposition est également reflétée dans les scores moyens : **C1 et C2 > +7**, alors que **AU0< –13**.

PC2 permet de distinguer efficacement les **oxalates** des **urates** et des **composés phosphatés instables**.

- **PC3 – Affinement des contrastes pour les struvites et classes mixtes**

Bien que la troisième composante n'explique qu'une part modeste de la variance (6,91 %), elle permet d'**affiner la séparation de certaines classes mixtes ou intermédiaires** :

- Les classes **STRUVITE** et **URATE** y sont **négativement corrélées**, avec des bandes contributives autour de **1010 à 1050 cm^{-1}**, fréquemment associées aux **groupes phosphate ammoniaco-magnésiens** ou aux **déformations secondaires** de la structure cristalline.
- Les classes **C2** et **AU0** y apparaissent, à l'inverse, **légèrement positives**, traduisant un comportement distinct en structure secondaire.

PC3 affine la séparation entre **classes mixtes ou hétérogènes**, en captant des **variations structurales plus subtiles**.

Ces résultats sont détaillés dans l'**Annexe 21** (Scores moyens par classe), l'**Annexe 22** (Poids des nombres d'onde) et l'**Annexe 23** (Bandes contributives par classe).

Les résultats confirment que les composantes principales extraites par l'ACP reflètent des **axes chimiques interprétables**, associés à des **groupes fonctionnels caractéristiques** des différents types de calculs. Cette décomposition spectrale structurée renforce la **pertinence de l'analyse multivariée** dans l'étude des lithiases urinaires, en fournissant une lecture chimique cohérente de la variabilité spectrale.

4.2.5.f Limites et perspectives

Malgré ces résultats prometteurs, l'ACP présente des limites. Les chevauchements entre C1 et C2, visibles dans les projections, ainsi que la dispersion intra-classe (ex. : Urate), indiquent que

cette méthode exploratoire ne permet pas une quantification précise des concentrations. Transitionnant vers une évaluation globale, ces contraintes soulignent la complémentarité de l'ACP avec des méthodes quantitatives, telles que les régressions Lasso-SVR et RF-Ridge, qui offrent une précision supérieure pour la prédiction des compositions chimiques, comme discuté dans la section 4.2.4.

4.3 Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence l'intérêt de l'analyse chimiométrique, combinant approches statistiques univariées et multivariées, dans l'étude des lithiases urinaires. L'analyse statistique univariée a permis de dégager plusieurs associations significatives entre les variables morphologiques, compositionnelles et les facteurs cliniques, contribuant à une meilleure compréhension des profils lithiasiques. Ces résultats ont confirmé certaines observations empiriques tout en révélant de nouvelles corrélations pertinentes.

L'ensemble de l'analyse multivariée a permis de démontrer la pertinence des approches chimiométriques pour l'étude des lithiases urinaires, en particulier lorsqu'elles sont appliquées à des données spectroscopiques issues de l'infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). Grâce à la combinaison de techniques de régression (PLS, Ridge, SVR) et de méthodes de sélection de variables (ANOVA, corrélation, Lasso, Random Forest, RFE), il a été possible de développer des modèles robustes, précis et généralisables pour la prédiction quantitative des principaux composants lithiasiques.

Les modèles optimisés, notamment Lasso-SVR et RF-Ridge, ont montré des performances particulièrement élevées, avec des coefficients de détermination supérieurs à 0,99 et des erreurs de prédiction (RMSE) faibles sur les données de test. La validation sur des échantillons réels (n = 257) a révélé un taux de concordance de 94,2 %**,** avec une sensibilité moyenne de 90,3 %**,** une précision de 92,7 %**,** un **s**core F moyen de 91,5 %**,** et une spécificité de 96 %**,** confirmant la fiabilité des modèles pour l'identification des composés majoritaires.

Les composés fréquents comme C1 (sensibilité 93,8 %, précision 95,2 %) et AU0 (sensibilité 92,3 %, précision 94,7 %) ont affiché des métriques élevées, tandis que les composés moins communs, tels que Struvit et Cystine, ont maintenu une spécificité supérieure à 95 %.

Par ailleurs, la capacité des modèles à détecter certains composés en faibles proportions, absents des identifications initiales, suggère une sensibilité accrue aux traces et renforce l'intérêt de ces approches dans le cadre d'un diagnostic plus fin.

La distribution spatiale des prédictions, en fonction des couches anatomiques des calculs (noyau, couche interne, couche externe), a mis en évidence des dynamiques évolutives dans la formation lithiasique, suggérant une implication séquentielle des composés (ex. : urate et struvite en phase initiale, carbapatite et C2 en phase avancée, transition vers C1 dans les couches profondes). Ces observations confirment et complètent les résultats morphologiques et expérimentaux décrits dans les chapitres précédents.

L'analyse en composantes principales valide l'hypothèse que les spectres IR permettent de différencier les calculs lithiasiques, grâce à une variance expliquée de 85,47 % par PC1 et PC2, et une séparation claire des classes chimiques dans les projections multidimensionnelles. Les bandes spectrales contributives, identifiées par les loadings et les scores, sous-tendent cette différenciation. Toutefois, les chevauchements et dispersions limitent l'ACP pour une analyse quantitative, la positionnant comme une méthode exploratoire efficace mais moins performante que les approches de régression pour l'automatisation du diagnostic des lithiases.

En somme, la chimiométrie appliquée aux données spectroscopiques et morphologiques se révèle être un outil puissant, rapide et complémentaire aux méthodes traditionnelles. Les modèles prédictifs développés peuvent être utilisés comme un moyen objectif et automatisable de détermination quantitative, notamment pour l'identification des composés majoritaires dans les lithiases. Les observations microscopiques, les analyses thermiques et les données cliniques viennent consolider ces prédictions, assurant ainsi un diagnostic plus robuste, reproductible et personnalisé.

CONCLUSION

Les lithiases urinaires représentent une pathologie fréquente et en constante augmentation, touchant une population de plus en plus jeune et sujette à des récidives. Leur prise en charge étiologique repose sur l'identification précise de leur composition chimique et sur la compréhension des mécanismes de formation, souvent complexes, notamment dans les cas de calculs mixtes ou multiloculaires.

Or, dans la pratique clinique courante, les méthodes de caractérisation restent parfois limitées, subjectives ou incomplètes, ce qui peut compromettre l'efficacité des stratégies de prévention personnalisée. Cette situation justifie la recherche de méthodes analytiques plus fiables, reproductibles et automatisables.

Dans ce contexte, cette étude a démontré la pertinence d'une approche intégrée combinant l'analyse morphologique, les techniques physico-chimiques et les méthodes chimiométriques pour la caractérisation approfondie des lithiases urinaires, face à la complexité croissante des calculs mixtes et à la variabilité interindividuelle des pathologies lithiasiques.

Dans un premier temps, l'analyse morphologique, fondée sur l'examen macroscopique et stéréomicroscopique, a permis d'établir une première classification visuelle des calculs à partir de critères standardisés tels que la couleur, la porosité, la dureté et l'aspect de surface. Cette approche a facilité la différenciation entre certaines formes pures et mixtes, et a montré une bonne cohérence avec les résultats d'identification chimique

Les analyses physico-chimiques ont renforcé la fiabilité de l'identification des composants. La spectroscopie infrarouge (FTIR), réalisée à partir de standards purs et de mélanges contrôlés, a permis d'identifier les signatures caractéristiques de chaque composé, facilitant l'analyse des échantillons complexes. Les analyses thermiques (DSC et TG) ont apporté une information complémentaire précieuse, notamment pour caractériser le degré d'hydratation des composés, comme dans le cas de la COM et COD ou AU0 et AU2, et pour confirmer certaines transitions thermiques spécifiques.

L'apport majeur de ce travail réside dans l'application d'outils chimiométriques à ces données complexes. L'analyse univariée a mis en lumière plusieurs associations significatives entre les caractéristiques des lithiases et les facteurs cliniques (sexe, IMC, âge, pathologies sous-jacentes).

L’analyse multivariée, reposant sur des modèles de régression multivariée (PLS, Ridge, SVR) associés à des méthodes de sélection de variables (ANOVA, corrélation, Lasso, Random Forest, RFE), a permis de quantifier avec précision les composants présents dans les calculs à partir des spectres FTIR. Les performances élevées des modèles développés, avec des coefficients de détermination souvent supérieurs à 0,99 et des erreurs de prédiction faibles, témoignent de la robustesse des prédictions. La capacité des modèles à détecter des composants présents à faibles proportions constitue un atout pour l’analyse des lithiases mixtes.

Par ailleurs, l’ACP appliquée aux spectres FTIR, a permis de capturer 85,47 % de la variance totale avec les deux premières composantes principales (PC1 et PC2), démontrant que les signatures spectrales différencient efficacement les calculs selon leur composition chimique. Cette méthode exploratoire a révélé des groupements distincts dans les projections multidimensionnelles, validant l’hypothèse que les spectres IR permettent une classification des lithiases, bien que des chevauchements entre certains composés (ex. : C1 et C2) limitent sa précision quantitative.

Ces résultats valident l’intérêt de la chimiométrie non seulement comme outil d’aide au diagnostic, mais aussi comme passerelle vers une prise en charge plus personnalisée des patients lithiasiques.

Ce travail met également en lumière la complémentarité des approches : la morphologie, la spectroscopie et la chimiométrie, lorsqu’elles sont intégrées, permettent une caractérisation fine et fiable des lithiases, Il renforce la standardisation des diagnostics, améliore l’objectivité de l’analyse, et ouvre des perspectives pour l’automatisation de la reconnaissance des profils lithiasiques à partir de données spectrales.

RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Recommandations

- **Standardisation des protocoles analytiques** :

Il est recommandé d'adopter des protocoles standardisés pour la préparation des échantillons et la mesure spectroscopique, afin de garantir la reproductibilité et la comparabilité des résultats entre laboratoires.

- **Utilisation systématique de la spectroscopie FTIR** :

Compte tenu de sa rapidité, sa sensibilité et sa capacité à identifier des mélanges complexes, la spectroscopie infrarouge devrait être intégrée en routine dans les laboratoires hospitaliers dédiés à l'analyse des lithiases urinaires

- **Mettre à disposition une base de données spectrale étalonnée** (standards purs et mélanges) pour chaque laboratoire, permettant de comparer plus facilement les spectres d'échantillons réels et d'assurer une identification fiable des composants, notamment dans les lithiases mixtes.

- **Intégration de la chimiométrie dans les laboratoires hospitaliers** :

Les outils chimiométriques, notamment les modèles prédictifs validés (Ridge, SVR), pourraient être intégrés à des logiciels dédiés permettant un diagnostic automatisé de la composition des lithiases.

- **Formation du personnel à l'interprétation chimiométrique** :

Une formation ciblée en spectroscopie devrait être proposée aux biologistes, techniciens et médecins impliqués dans la prise en charge des patients lithiasiques.

- **Corrélation systématique avec les données cliniques** :

Il est essentiel de systématiquement corréler les données analytiques (morphologie, spectroscopie, modélisation) avec les données cliniques, métaboliques et diététiques du patient pour une approche diagnostique globale.

Perspectives

Cette étude ouvre plusieurs pistes de prolongement, tant sur le plan méthodologique que clinique :

- **Renforcer l'approche intégrée** : L'intégration systématique des données morphologiques, spectroscopiques et cliniques, combinée à l'analyse chimiométrique, pourrait améliorer la compréhension globale de la lithogenèse et affiner les stratégies de prévention personnalisée.
- **Élargir et diversifier la base d'échantillons** : Une validation sur des cohortes multicentriques, incluant diverses régions et profils de patients, renforcerait la robustesse et la généralisabilité des modèles développés.
- **Optimiser les modèles par l'ajout de données cliniques et biochimiques** : L'intégration de paramètres urinaires (oxalurie, calciurie, pH, infections) permettrait de prédire non seulement la composition, mais aussi les causes sous-jacentes des lithiases.
- **Développer des outils intelligents d'aide au diagnostic** : La création d'une application ou d'une plateforme basée sur la spectroscopie FTIR et l'intelligence artificielle faciliterait l'identification automatisée des composés lithiasiques en pratique courante.
- **Explorer des extensions analytiques ciblées** : L'utilisation de techniques complémentaires (Raman, NIR, MEB-EDS) pourrait enrichir l'analyse dans des cas complexes ou médicamenteux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. A C, G C. Trends in the prevalence of kidney stones in the United States from 2007 to 2016. Urolithiasis [Internet]. févr 2021 [cité 14 mai 2025];49(1). Disponible sur: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32870387/
2. Cheng WY, Tseng JS. Urinary stone analysis and clinical characteristics of 496 patients in Taiwan. Sci Rep. 19 juin 2024;14(1):14115.
3. Kittanamongkolchai W, Vaughan LE, Enders FT, Dhondup T, Mehta RA, Krambeck AE, et al. The Changing Incidence and Presentation of Urinary Stones Over 3 Decades. Mayo Clinic Proceedings. 1 mars 2018;93(3):291-9.
4. Liu Y, Chen Y, Liao B, Luo D, Wang K, Li H, et al. Epidemiology of urolithiasis in Asia. Asian Journal of Urology. 1 oct 2018;5(4):205-14.
5. Aizezi X, Xie L, Xie H, Li J, Shang Z, Liu C. Epidemiological and clinical characteristics of stone composition: a single-center retrospective study. Urolithiasis [Internet]. 2022 [cité 13 mai 2025];50(1). Disponible sur: https://link.springer.com/epdf/10.1007/s00240-021-01274-2
6. Stamatelou K, Goldfarb DS. Epidemiology of Kidney Stones. Healthcare. janv 2023;11(3):424.
7. Daudon M, Jungers P, Bazin D, Williams JC. Recurrence rates of urinary calculi according to stone composition and morphology. Urolithiasis. 1 oct 2018;46(5):459-70.
8. D'Costa MR, Haley WE, Mara KC, Enders FT, Vrtiska TJ, Pais VM, et al. Symptomatic and Radiographic Manifestations of Kidney Stone Recurrence and Their Prediction by Risk Factors: A Prospective Cohort Study. Journal of the American Society of Nephrology. juill 2019;30(7):1251.
9. Ye Z, Zeng G, Yang H, Li J, Tang K, Wang G, et al. The status and characteristics of urinary stone composition in China. BJU International. 2020;125(6):801-9.
10. Katz JE, Soodana-Prakash N, Jain A, Parmar M, Smith N, Kryvenko O, et al. Influence of Age and Geography on Chemical Composition of 98043 Urinary Stones from the USA. European Urology Open Science. 1 déc 2021;34:19-26.
11. Nazari A, Jamali Z, Soltani N, Khalili P, Esmaeili-nadimi A, Kahnoji M, et al. Kidney stone and risk of cardiovascular diseases: a cross-sectional study in the southeast of Iran. BMC Nephrology. 25 févr 2025;26(1):101.
12. Khan SR, Pearle MS, Robertson WG, Gambaro G, Canales BK, Doizi S, et al. Kidney stones. Nat Rev Dis Primers. 25 févr 2016;2(1):1-23.
13. Mandel NS, Mandel IC, Kolbach-Mandel AM. Accurate stone analysis: the impact on disease diagnosis and treatment. Urolithiasis [Internet]. 2017 [cité 14 mai 2025];45(1). Disponible sur: https://link.springer.com/epdf/10.1007/s00240-016-0943-0
14. Liu Y, Jin X, Hong HG, Xiang L, Jiang Q, Ma Y, et al. The relationship between gut microbiota and short chain fatty acids in the renal calcium oxalate stones disease. The FASEB Journal. 2020;34(8):11200-14.
15. Ingvarsdottir SE, Indridason OS, Palsson R, Edvardsson VO. Stone recurrence among childhood kidney stone formers: results of a nationwide study in Iceland. Urolithiasis. 1 oct 2020;48(5):409-17.
16. Khan AH, Imran S, Talati J, Jafri L. Fourier transform infrared spectroscopy for analysis of kidney stones. Investigative and Clinical Urology. 1 janv 2018;59(1):32-7.

17. Peerapen P, Thongboonkerd V. Kidney Stone Prevention. Adv Nutr. 9 mars 2023;14(3):555-69.
18. Diangienda PKD, Moningo DM, Makulo JRR, Sumaili EK, Mafuta EM, Mayindu AN, et al. Morpho-constitutional analysis of urinary stones from patients with urolithiasis in the Democratic Republic of Congo. African Journal of Urology. 21 juill 2021;27(1):99.
19. Zhang D, Li S, Zhang Z, Li N, Yuan X, Jia Z, et al. Urinary stone composition analysis and clinical characterization of 1520 patients in central China. Sci Rep. 19 mars 2021;11(1):6467.
20. Shabsoug BM, Al-Quraishi A, Al-Mgassgas H. Analysis of Urinary Calculi by Fourier Transform Infrared Spectroscopy for Patients in Northern Jordan. EJCHEM. 23 nov 2022;3(4):20-6.
21. Cloutier J, Villa L, Traxer O, Daudon M. Kidney stone analysis: "Give me your stone, I will tell you who you are!" World J Urol. 1 févr 2015;33(2):157-69.
22. Basiri A, Tahvildari A, Naji M, Ziaeefar P, Kashi AH. Determination of the kidney stone composition using infrared spectroscopy in Iran at a national referral center during 2019–2023. Asian Journal of Urology. janv 2025;12(1):72-8.
23. Boichenko E, Paronnikov M, Kirsanov D. Pilot Study on the Qualitative Analysis of Urinary Stones Using Near-Infrared Spectroscopy and Chemometrics. Engineering Proceedings. 2023;48(1):64.
24. Fan M, Liu X, Yu X, Cui X, Cai W, Shao X. Near-infrared spectroscopy and chemometric modelling for rapid diagnosis of kidney disease. Sci China Chem. 1 févr 2017;60(2):299-304.
25. VanPutte CL, Regan JL, Russo AF. Seeley's essentials of anatomy & physiology. Tenth edition. New York, NY: McGraw-Hill Education; 2019.
26. Losito A. Calculus Renal Disease. In: Berbari AE, Mancia G, éditeurs. Disorders of Blood Pressure Regulation [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2018 [cité 26 mai 2025]. p. 341-50. (Updates in Hypertension and Cardiovascular Protection). Disponible sur: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-59918-2_22
27. Eaton DC, Pooler J, Vander AJ. Vander's Renal Physiology (7th Edition). 7th ed. New York, USA: McGraw-Hill Professional Publishing; 2009.
28. Jones TL, Horton-Szar D, Harris KPG. renal and urinary system. 4th ed. London: Elsevier Health Sciences UK; 2012.
29. Lawrence EA, Doherty D, Dhanda R. Function of the nephron and the formation of urine. Anaesthesia & Intensive Care Medicine. mai 2018;19(5):249-53.
30. Richard L. Drake, A. Wayne Vogl, Adam W.M. Mitchell. Gray's Basic Anatomy. 2nd éd. 2018. 6638 p.
31. Friedrich Paulsen, Jens Waschke. Atlas of_AnatomyVolume. 16 th. Elsevier GmbH; 2018. 350 p.
32. Moinuddin Z, Dhanda R. Anatomy of the kidney and ureter. Anaesthesia & Intensive Care Medicine. juin 2015;16(6):247-52.
33. Samuel L. The Anatomy of the Kidney [Internet]. Interactive Biology, with Leslie Samuel. 2012 [cité 26 mai 2025]. Disponible sur: https://interactivebiology.com/3254/the-anatomy-of-the-kidney/

34. Éducation des patients : Structure du néphron | Néphrologie de la Rive-Sud [Internet]. [cité 26 mai 2025]. Disponible sur: https://southshorenephrology.com/education/page/nephron-structure
35. Structure du corpuscule rénal, étiquetée : illustration de stock 147943916 [Internet]. Shutterstock. [cité 26 mai 2025]. Disponible sur: https://www.shutterstock.com/fr/image-illustration/renal-corpuscle-structure-labeled-147943916
36. Sy S, Samaké M, Fofana AS, Kodio A, Oman OP, Sy D, et al. Renal Failure of Lithiasis Origin: Frequency and Management in the Nephrology and Haemodialysis Department of the Point G University Hospital in Mali. OJNeph. 2022;12(03):276-92.
37. A. Skolarikos (Chair). EAU-Guidelines-on-Urolithiasis-2024. 2024.
38. Silbernagl S, Despopoulos A. Atlas de poche de physiologie. 3e éd. française, [3e tirage]. Paris: Flammarion médecine-sciences; 2004.
39. Corrales M, Doizi S, Barghouthy Y, Traxer O, Daudon M. Classification of Stones According to Michel Daudon: A Narrative Review. European Urology Focus. janv 2021;7(1):13-21.
40. Mahadevan V. Anatomy of the lower urinary tract. Surgery (Oxford). juill 2016;34(7):318-25.
41. Adnan WAHWM, Nigwekar SU. Calcium Stone: Pathophysiology, Prevention, and Medical Management. In: Han H, Mutter WP, Nasser S, éditeurs. Nutritional and Medical Management of Kidney Stones [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2019 [cité 26 mai 2025]. p. 93-106. Disponible sur: http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-15534-6_7
42. Acharya V, Olivero J. The Kidney as an Endocrine Organ. Methodist Debakey Cardiovasc J. 2018;14(4):305-7.
43. Holmes RP, Assimos DG. The impact of dietary oxalate on kidney stone formation. Urol Res. oct 2004;32(5):311-6.
44. Taylor EN, Stampfer MJ, Curhan GC. Dietary Factors and the Risk of Incident Kidney Stones in Men: New Insights after 14 Years of Follow-up. Journal of the American Society of Nephrology. déc 2004;15(12):3225-32.
45. Hickling DR, Sun TT, Wu XR. Anatomy and Physiology of the Urinary Tract: Relation to Host Defense and Microbial Infection. In: Mulvey MA, Klumpp DJ, Stapleton AE, éditeurs. Urinary Tract Infections [Internet]. Washington, DC, USA: ASM Press; 2016 [cité 26 mai 2025]. p. 1-25. Disponible sur: http://doi.wiley.com/10.1128/9781555817404.ch1
46. Hamroun A. Evaluation des pratiques néphrologiques dans la prise en charge de la maladie rénale chez le sujet âgé [Thèse de doctorat]. [Paris Saclay]: l'université Paris-Saclay; 2022.
47. Faa G, Fanos V, éditeurs. Kidney Development in Renal Pathology [Internet]. New York, NY: Springer New York; 2014 [cité 26 mai 2025]. (Current Clinical Pathology). Disponible sur: https://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-0947-6
48. Comité Lithiase de l'Association Française d'Urologie. Recommandations de bonne pratique pour la prise en charge des calculs et de la lithiase urinaires: diagnostic,

traitement, suivi et prévention secondaire,Recommandations de bonne pratique. In: Association Française d'Urologie. Paris; 2022. p. 233.

49. Wang P, Zhang H, Zhou J, Jin S, Liu C, Yang B, et al. Study of risk factor of urinary calculi according to the association between stone composition with urine component. Sci Rep. 22 avr 2021;11(1):8723.
50. Khan SR, Pearle MS, Robertson WG, Gambaro G, Canales BK, Doizi S, et al. Kidney stones. Nat Rev Dis Primers. 25 févr 2016;2(1):16008.
51. Bangaru S, Veeram JR. A REVIEW ON ANTI-UROLITHIATIC ACTIVITY OF MEDICINAL PLANTS. JCP. 2014;01(03):51-68.
52. Ahmed A, Rachid D, Elwahab CA, Brahim K, de Conférences M, de Conférences M, et al. Etude des paramètres physicochimiques et biologiques de la lithiase urinaire et corrélation cristallurie - infection urinaire.
53. López M, Hoppe B. History, epidemiology and regional diversities of urolithiasis. Pediatr Nephrol. 1 janv 2010;25(1):49-59.
54. Moftakhar L, Jafari F, Ghoddusi Johari M, Rezaeianzadeh R, Hosseini SV, Rezaianzadeh A. Prevalence and risk factors of kidney stone disease in population aged 40-70 years old in Kharameh cohort study: a cross-sectional population-based study in southern Iran. BMC Urol. 19 déc 2022;22(1):205.
55. Stamatelou K, Goldfarb DS. Epidemiology of Kidney Stones. Healthcare (Basel). 2 févr 2023;11(3):424.
56. BOUHZILA Chaima, TITEM Yacine. Enquête ethnobotanique des plantes médicinales. Université A. MIRA – Bejaïa; 2023.
57. Rim M, Abdelatif B, Dalila S, Michel D. Évaluation de l'effet antilithiasique, cystinique et oxalo-calcique d'extrait aqueux de Zilla spinosa L. [Internet]. 2023 [cité 25 mai 2025]. Disponible sur: https://hal.science/hal-03952113
58. Alelign T, Petros B. Kidney Stone Disease: An Update on Current Concepts. Advances in Urology. 2018;2018:1-12.
59. Lewandowski. The influence of a high-oxalate/low-calcium diet on calcium oxalate renal stone risk factors in non-stone-forming black and white South African subjects - - 2001 - BJU International - [Internet]. 2001 [cité 21 févr 2025]. Disponible sur: https://bjui-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1464-410x.2001.00064.x
60. Bouzidi H, Majdoub A, Daudon M, Najjar MF. Hyperoxalurie primitive : une revue de la littérature. Néphrologie & Thérapeutique. nov 2016;12(6):431-6.
61. Guerra A, Ticinesi A, Allegri F, Pinelli S, Aloe R, Meschi T. Idiopathic calcium nephrolithiasis with pure calcium oxalate composition: clinical correlates of the calcium oxalate dihydrate/monohydrate (COD/COM) stone ratio. Urolithiasis. juin 2020;48(3):271-9.
62. Kaaroud El Jery H, Harzallah A, Chouchi S, Talbi E, Baccouch H, Abdelmoula J, et al. Recherche de facteurs lithogènes au cours des lithiases oxalo-calciques : enquête épidémiologique. Progrès en Urologie. juin 2016;26(8):450-6.
63. Moe OW. Kidney stones: pathophysiology and medical management. 2006;367.
64. Pak CYC, Odvina CV, Pearle MS, Sakhaee K, Peterson RD, Poindexter JR, et al. Effect of dietary modification on urinary stone risk factors. Kidney International. nov 2005;68(5):2264-73.

65. Asselman M, Verkoelen CF. Fructose intake as a risk factor for kidney stone disease. Kidney International. 2 janv 2008;73(2):139-40.
66. Castiglione V, Jouret F, Bruyère O, Dubois B, Thomas A, Waltregny D, et al. Épidémiologie de la lithiase urinaire en Belgique sur base d'une classification morpho-constitutionnelle. Néphrologie & Thérapeutique. févr 2015;11(1):42-9.
67. Siener R, Rüdy J, Herwig H, Schmitz MT, Schaefer RM, Lossin P, et al. Mixed stones: urinary stone composition, frequency and distribution by gender and age. Urolithiasis. 8 janv 2024;52(1):24.
68. Rieu P. Lithiases d'infection. Annales d'Urologie. févr 2005;39(1):16-29.
69. Dr.A.BENMESSAOUD. Lithiase-urinaire. 2024;15.
70. Rao NP, Preminger GM, Kavanagh JP, éditeurs. Urinary Tract Stone Disease [Internet]. London: Springer London; 2011 [cité 26 mai 2025]. Disponible sur: https://link.springer.com/10.1007/978-1-84800-362-0
71. Palsson R. Genetic Causes of Kidney Stones: Cystinuria, Primary Hyperoxaluria, Dent's Disease, and APRT Deficiency. In: Grasso M, Goldfarb DS, éditeurs. Urinary Stones [Internet]. 1re éd. Wiley; 2014 [cité 26 mai 2025]. p. 57-69. Disponible sur: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118405390.ch6
72. Boyd C, Wood K, Whitaker D, Assimos DG. The influence of metabolic syndrome and its components on the development of nephrolithiasis. Asian Journal of Urology. 1 oct 2018;5(4):215-22.
73. Maalouf NM. Uric Acid Stones. In: Grasso M, Goldfarb DS, éditeurs. Urinary Stones [Internet]. 1re éd. Wiley; 2014 [cité 26 mai 2025]. p. 26-35. Disponible sur: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118405390.ch3
74. Daudon M, Letavernier E, Frochot V, Haymann JP, Bazin D, Jungers P. Respective influence of calcium and oxalate urine concentration on the formation of calcium oxalate monohydrate or dihydrate crystals. Comptes Rendus Chimie. 4 oct 2016;19(11-12):1504-13.
75. Pasquali N. Les troubles urinaires et vésicaux induits par les médicaments [Sciences pharmaceutiques]. [dumas]: UNIVERSITE JOSEPH FOURIER; 2012.
76. Daudon M, Traxer O, Lechevallier E, Saussine C. La lithogenèse. Progrès en Urologie. déc 2008;18(12):815-27.
77. Daudon M, Dessombz A, Frochot V, Letavernier E, Haymann JP, Jungers P, et al. Comprehensive morpho-constitutional analysis of urinary stones improves etiological diagnosis and therapeutic strategy of nephrolithiasis. Comptes Rendus Chimie. 9 juin 2016;19(11-12):1470-91.
78. Mellouki A, Ziba OD, Ahsaini M, Mellas S, Elammari J, Tazi M, et al. Le bilan métabolique dans la pathologie lithiasique : qui, quand et comment ? Biologie médicale. 2021;1.
79. Haslett D.C, Chilvers E. R, Boon N. A, Colledge N. R, Hunter J. A. Médecine interne : principes et pratique. 12 ème édition. Medecine-Science/ Flammarion; 2004. p 837-840.
80. Fontenelle LF, Sarti TD. Kidney Stones: Treatment and Prevention. Am Fam Physician. 15 avr 2019;99(8):490-6.
81. Cynthia J, Denu-Ciocca, Romulo E, Colindres. calculs urinaires (néphrolitiase). Elsevier Masson SAS. 2011.

82. Doizi S, Letendre J, Bensalah K, Traxer O. Prise en charge pharmacologique de la lithiase urinaire. Progrès en Urologie. 1 nov 2013;23(15):1312-7.
83. Parks JH, Coe FL. Pathogenesis and treatment of calcium stones. Semin Nephrol. sept 1996;16(5):398-411.
84. Schlomer BJ. Urologic treatment of nephrolithiasis. Curr Opin Pediatr. avr 2020;32(2):288-94.
85. Wang P, Zhang H, Zhou J, Jin S, Liu C, Yang B, et al. Study of risk factor of urinary calculi according to the association between stone composition with urine component. Sci Rep. 22 avr 2021;11(1):8723.
86. Daudon M, Jungers P, Bazin D, Williams JC. Recurrence rates of urinary calculi according to stone composition and morphology. Urolithiasis. oct 2018;46(5):459-70.
87. Brdarić Kosanović J, Živković K, Šerić V, Marković B, Szenti I, Kukovecz Á, et al. Analysis of Human Kidney Stones Using Advanced Characterization Techniques. Crystals. janv 2025;15(1):6.
88. Sofińska-Chmiel W, Goliszek M, Drewniak M, Nowicka A, Kuśmierz M, Adamczuk A, et al. Chemical Studies of Multicomponent Kidney Stones Using the Modern Advanced Research Methods. Molecules. 16 août 2023;28(16):6089.
89. Sigdel G, Lamichhane N, K.C. SR, Belokar WK. Chemical Analysis of Urinary Stones. J Soc Surg Nepal. 31 déc 2016;19(2):10-2.
90. Gilad R, Williams JC, Usman KD, Holland R, Golan S, Tor R, et al. Interpreting the results of chemical stone analysis in the era of modern stone analysis techniques. J Nephrol. févr 2017;30(1):135-40.
91. Primiano A, Persichilli S, Gambaro G, Ferraro PM, D'Addessi A, Cocci A, et al. FT-IR Analysis of Urinary Stones: A Helpful Tool for Clinician Comparison with the Chemical Spot Test. Disease Markers. 2014;2014:1-5.
92. Benzine M. Infrared Spectroscopy Analysis of Kidney Stones: Methodology of Identification. Medires Publishing LLC, éditeur. CTBR. 28 févr 2023;2(1):01-3.
93. Ortiz Ortega E, Hosseinian H, Rosales López MJ, Rodríguez Vera A, Hosseini S. Characterization Techniques for Chemical and Structural Analyses. In: Ortiz Ortega E, Hosseinian H, Aguilar Meza IB, Rosales López MJ, Rodríguez Vera A, Hosseini S, éditeurs. Material Characterization Techniques and Applications [Internet]. Singapore: Springer; 2022 [cité 14 mai 2025]. p. 93-152. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-981-16-9569-8_4
94. Daudon M, Haymann JP, Estrade V, Meria P, Almeras C. 2022 Recommendations of the AFU Lithiasis Committee: Epidemiology, stone analysis and composition. Progrès en Urologie. 1 nov 2023;33(14):737-65.
95. Gervasoni J, Primiano A, Ferraro PM, Urbani A, Gambaro G, Persichilli S. Improvement of Urinary Stones Analysis Combining Morphological Analysis and Infrared Spectroscopy. Journal of Chemistry. 2018;2018:1-7.
96. Costa-Bauzá A, Grases F, Julià F. The power of desktop scanning electron microscopy with elemental analysis for analyzing urinary stones. Urolithiasis. 15 mars 2023;51(1):50.
97. fergia R. Electron Microscopy Methods and Protocols Electron - Laboratorium [Internet]. Vol. 117. 2022 [cité 14 mai 2025]. 280 p. Disponible sur:

https://fliphtml5.com/arvfv/ipsg/Electron_Microscopy_Methods_and_Protocols_Electron_-_Laboratorium/

98. Sanu D. Douglas.B. Murphy. Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging [Internet]. 2020 [cité 14 mai 2025]. 357 p. Disponible sur: https://fliphtml5.com/rtvzi/mzjl/Douglas.B._Murphy._Fundamentals_of_Light_Microscopy_and_Electronic_Imaging/
99. Hari P. Paudel. optical_microscopy, principales applications. Wellman Center for Photomedicine. 2018;49.
100. Chatterjee P, Chakraborty A, Mukherjee AK. Phase composition and morphological characterization of human kidney stones using IR spectroscopy, scanning electron microscopy and X-ray Rietveld analysis. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. juill 2018;200:33-42.
101. European Pharmacopoeia (Ph. Eur.) 11th Edition - European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare - EDQM [Internet]. European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare. [cité 14 mai 2025]. Disponible sur: https://www.edqm.eu/en/european-pharmacopoeia-ph.-eur.-11th-edition
102. Hamon M, Pellerin F, Guernet M, Mahuzier G. Chimie analytique. Tome 3 : Méthodes spectrales et analyse organique. 2e éd. Issy-les-Moulineaux (Hauts-de-Seine): Masson; 1990. 269 p. (Abrégés de pharmacie).
103. HALLGRAFIX. Fundamentals of Chemistry [Internet]. [cité 14 mai 2025]. Disponible sur: https://fliphtml5.com/cits/ehsp/Fundamentals_of_Chemistry/
104. Rouessac Annick BdC. ANALYSE CHIMIQUE Méthodes et techniques instrumentales modernes 6 e édition Francis. 2006;481.
105. Christoph Wregg, Dominik Rosenlechner, Verena Zach, Marco Eigenfeld, Edith Stabentheiner, Sascha Ahyai, et al. FT-IR Spectroscopy Analysis of Kidney Stone Variability in Styria. 29 sept 2024;14(10):854.
106. Santé O mondiale de la. Assurance de la qualité des produits pharmaceutiques : recueil de directives et autres documents : vol. 1 [Internet]. Organisation mondiale de la Santé; 1998 [cité 16 mai 2025]. Disponible sur: https://iris.who.int/handle/10665/42015
107. LALAOUNA Abd El Djalil. ANALYSE CHIMIOMETRIQUE MULTIVARIEE DES DONNEES CHIMIQUES ET INSTRUMENTALES * Applications au contrôle de qualité des médicaments * [D.E.S.M]. [CONSTANTINE]: UNIVERSITE SALAH BOUBNIDER CONSTANTINE 3; 2018.
108. Soares JANT. Introduction to Optical Characterization of Materials. In: Sardela M, éditeur. Practical Materials Characterization [Internet]. New York, NY: Springer; 2014 [cité 14 mai 2025]. p. 43-92. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9281-8_2
109. Asyana V, Haryanto F, Fitri LA, Ridwan T, Anwary F, Soekersi H. Analysis of urinary stone based on a spectrum absorption FTIR-ATR. J Phys: Conf Ser. mars 2016;694:012051.
110. Peter R. Griffiths, James A. De Haseth. Fourier Transform Infrared Spectrometry [Internet]. 2007 [cité 16 mai 2025]. Disponible sur: https://books.google.dz/books/about/Fourier_Transform_Infrared_Spectrometry.html?hl=es&id=ZecrNiUkHToC&redir_esc=y

111. BrianC.Smith. Fundamentals of FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROSCOPY. 2nd éd. Taylor and Francis Group, LLC; 2011. 198 p.
112. Bernard HUMBERT, Jean-Yves MEVELLEC, Jérôme GRAUSEM, Manuel DOSSOT, Cédric CARTERET. Spectrométrie d'absorption dans l'infrarouge [Internet]. Techniques de l'Ingénieur. 2023 [cité 16 mai 2025]. Disponible sur: https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/spectrometrie-atomique-et-spectrometrie-moleculaire-42707210/spectrometrie-d-absorption-dans-l-infrarouge-p2850/
113. Peter Larkin. Infrared and Raman Spectroscopy 2nd Edition [Internet]. 2017 [cité 16 mai 2025]. Disponible sur: https://shop.elsevier.com/books/infrared-and-raman-spectroscopy/larkin/978-0-12-804162-8
114. Müllertz A, Perrie Y, Rades T, éditeurs. Analytical Techniques in the Pharmaceutical Sciences [Internet]. New York, NY: Springer New York; 2016 [cité 16 mai 2025]. (Advances in Delivery Science and Technology). Disponible sur: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-4029-5
115. Frochot V, Daudon M. Clinical value of crystalluria and quantitative morphoconstitutional analysis of urinary calculi. Int J Surg. déc 2016;36(Pt D):624-32.
116. B N, Na C, Aw G. Rapid and reliable method for composition of concentric layers of kidney stones by fourier transform infrared spectroscopy with KSLS-13. Pakistan journal of pharmaceutical sciences [Internet]. janv 2020 [cité 15 mai 2025];33(1). Disponible sur: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32122831/
117. Abraham J, Mohammed AP, Ajith Kumar MP, George SC, Thomas S. Chapter 8 - Thermoanalytical Techniques of Nanomaterials. In: Mohan Bhagyaraj S, Oluwafemi OS, Kalarikkal N, Thomas S, éditeurs. Characterization of Nanomaterials [Internet]. Woodhead Publishing; 2018 [cité 17 mai 2025]. p. 213-36. (Micro and Nano Technologies). Disponible sur: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081019733000080
118. Akash MSH, Rehman K. Introduction to Thermal Analysis. In: Akash MSH, Rehman K, éditeurs. Essentials of Pharmaceutical Analysis [Internet]. Singapore: Springer Nature; 2020 [cité 17 mai 2025]. p. 195-8. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-981-15-1547-7_16
119. Feist M. Thermal analysis: basics, applications, and benefit. ChemTexts. 24 févr 2015;1(1):8.
120. Cheremisinoff NP. T-THERMAL ANALYSIS. In: Cheremisinoff NP, éditeur. Condensed Encyclopedia of Polymer Engineering Terms [Internet]. Boston: Butterworth-Heinemann; 2020 [cité 17 mai 2025]. p. 301-26. Disponible sur: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978008050282350024X
121. Akash MSH, Rehman K. Thermo Gravimetric Analysis. In: Akash MSH, Rehman K, éditeurs. Essentials of Pharmaceutical Analysis [Internet]. Singapore: Springer Nature; 2020 [cité 17 mai 2025]. p. 215-22. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-981-15-1547-7_19
122. Sergey Vyazovkin, Nobuyoshi Koga, Christoph Schick. Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry [Internet]. 2nd éd. Vol. 6. 2018 [cité 17 mai 2025]. Disponible sur:

https://shop.elsevier.com/books/handbook-of-thermal-analysis-and-calorimetry/vyazovkin/978-0-444-64062-8

123. EL-Shorbagy H, Mohamed M, El-Gendy A, Belal F, Hadad G. Thermogravimetric analysis and decomposition kinetics of velpatasvir co-povidone under non-isothermal conditions. Records of Pharmaceutical and Biomedical Sciences. 1 janv 2023;7(1):27-33.
124. Mojumdar SC, Sain M, Prasad RC, Sun L, Venart JES. Selected thermoanalytical methods and their applications from medicine to construction: Part I. J Therm Anal Calorim. déc 2007;90(3):653-62.
125. Emmanuel WIRTH, Fabien GUITTENY, Christophe MATHONAT. Thermogravimétrie [Internet]. Techniques de l'Ingénieur. 2020 [cité 17 mai 2025]. Disponible sur: https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/methodes-thermiques-d-analyse-42384210/thermogravimetrie-p1260/
126. Abel Hurtado-Macias, Alfredo Nevárez, M M Nevárez-Rascón, Raul Herrera-Basurto. Three-dimensional structural tomography and thermal characterization of the kidney stones and gallstones to know the temperature disintegration | Request PDF. ResearchGate [Internet]. 2024 [cité 17 mai 2025]; Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/382745433_Three-dimensional_structural_tomography_and_thermal_characterization_of_the_kidney_stones_and_gallstones_to_know_the_temperature_disintegration
127. Fatih Firdolas, Tankut Ates, Niyazi Bulut, Omer Kaygili. Thermal and structural characterization of the kidney stone | Request PDF. ResearchGate [Internet]. 2019 [cité 17 mai 2025]; Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/337288868_Thermal_and_structural_characterization_of_the_kidney_stone
128. Hosseinian H, Ortiz Ortega E, Aguilar Meza IB, Rodríguez Vera A, Rosales López MJ, Hosseini S. Characterization Techniques for Thermal Analysis. In: Ortiz Ortega E, Hosseinian H, Aguilar Meza IB, Rosales López MJ, Rodríguez Vera A, Hosseini S, éditeurs. Material Characterization Techniques and Applications [Internet]. Singapore: Springer; 2022 [cité 18 févr 2025]. p. 153-80. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-981-16-9569-8_5
129. Menczel JD, Prime RB, éditeurs. Thermal analysis of polymers: fundamentals and applications. Hoboken, N.J: John Wiley; 2020. 688 p.
130. Thermogravimétrie : Dossier complet | Techniques de l'Ingénieur [Internet]. [cité 18 mai 2025]. Disponible sur: https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/methodes-thermiques-d-analyse-42384210/thermogravimetrie-p1260/
131. Alejandra María Zambrano Arévalo, Grey Cecilia Castellar Ortega, William Andrés Vallejo Lozada, Ismael Enrique Piñeres Ariza, María Mercedes Cely Bautista, Jesús Sigifredo Valencia Ríos. Conceptual approach to thermal analysis and its main applications. Prospectiva [Internet]. 2017 [cité 18 mai 2025];15(N°2). Disponible sur: https://www.redalyc.org/journal/4962/496254902013/html/
132. Zainal NFA, Saiter JM, Halim SIA, Lucas R, Chan CH. Thermal analysis: basic concept of differential scanning calorimetry and thermogravimetry for beginners. Chemistry Teacher International. 1 juin 2021;3(2):59-75.

133. Akash MSH, Rehman K. Differential Scanning Calorimetry. In: Akash MSH, Rehman K, éditeurs. Essentials of Pharmaceutical Analysis [Internet]. Singapore: Springer Nature; 2020 [cité 17 mai 2025]. p. 199-206. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-981-15-1547-7_17
134. Hubert S. Transitions de phases solides induites par un procédé de compression directe: application à la caféine et à la carbamazépine [Alimentation et Nutrition]. [lyon]: Université Claude Bernard; 2012.
135. Juban A. Transformation Induite au cours d'un Procédé Industriel (TIPI) de compression directe: transition polymorphique de la caféine et propriétés physiques des comprimés [Génie chimique]. [Lyon]: Université de Lyon; 2016.
136. Jean GRENET, Bernard LEGENDRE. Analyse calorimétrique différentielle à balayage (DSC) [Internet]. Techniques de l'Ingénieur. 2018 [cité 18 mai 2025]. Disponible sur: https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/methodes-thermiques-d-analyse-42384210/analyse-calorimetrique-differentielle-a-balayage-dsc-p1205/
137. Leyva-Porras C, Cruz-Alcantar P, Espinosa-Solís V, Martínez-Guerra E, Piñón-Balderrama CI, Compean Martínez I, et al. Application of Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Modulated Differential Scanning Calorimetry (MDSC) in Food and Drug Industries. Polymers. 18 déc 2019;12(1):5.
138. Brereton RG, Jansen J, Lopes J, Marini F, Pomerantsev A, Rodionova O, et al. Chemometrics in analytical chemistry—part II: modeling, validation, and applications. Anal Bioanal Chem. oct 2018;410(26):6691-704.
139. Gemperline P, éditeur. Practical guide to chemometrics. 2nd ed. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis; 2006. 541 p.
140. Carlo Adamo, Sylvie Bégin-Colin, François-Xavier Coudert, Guillaume Fayet, Loïc Jierry, Michel Lutz, Mario Maglione, et al. Chimie et intelligence artificielle.
141. Varmuza K, Filzmoser P. Introduction to Multivariate Statistical Analysis in Chemometrics [Internet]. 1ère édition. CRC Press; 2016 [cité 24 mai 2025]. Disponible sur: https://www.taylorfrancis.com/books/9781420059496
142. Panchuk V, Semenov V, Kirsanov D. Chemometric Processing of X-Ray Fluorescence Data. In: X-Ray Fluorescence in Biological Sciences [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2022 [cité 24 mai 2025]. p. 551-62. Disponible sur: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119645719.ch34
143. Rinnan Å, Berg F van den, Engelsen SB. Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. TrAC Trends in Analytical Chemistry. 1 nov 2009;28(10):1201-22.
144. Estrade V, Daudon M, Richard E, Bernhard JC, Bladou F, Robert G, et al. Towards automatic recognition of pure and mixed stones using intra-operative endoscopic digital images. BJU Int. févr 2022;129(2):234-42.
145. Yang X, Zhang C, Qi S, Zhang Z, Shi Q, Liu C, et al. Multivariate Analyses of Urinary Calculi Composition: A 13-Year Single-Center Study. J Clin Lab Anal. nov 2016;30(6):873-9.

146. Kim US, Kwon HS, Yang W, Lee W, Choi C, Kim JK, et al. Prediction of the composition of urinary stones using deep learning. Investigative and Clinical Urology. 1 juill 2022;63(4):441-7.
147. Abdelouahed AIT IDER. Réalisation d'un système de reconnaissance pour la détection de la lithiase urinaire. Université Sultan Moulay Slimane; 2018.
148. Ekaterina Boichenko, Mikhail Paronnikov, Anna Reznichenko, Dmitry Korolev. Classification of urinary stones using near-infrared spectroscopy and chemometrics: A promising method for intraoperative application | Request PDF. ResearchGate [Internet]. 28 avr 2025 [cité 19 mai 2025]; Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/390444909_Classification_of_urinary_stones_using_near-infrared_spectroscopy_and_chemometrics_a_promising_method_for_intraoperative_application
149. Lee KR, Lin X, Park DC, Eslava S. Megavariate data analysis of mass spectrometric proteomics data using latent variable projection method. PROTEOMICS. 2003;3(9):1680-6.
150. Haddad JE. Chimiométrie appliquée à la spectroscopie de plasma induit par laser (LIBS) et à la spectroscopie terahertz [Doctorat en laser, matière, nanosciences]. Université Sciences et Technologies - Bordeaux; 2014.
151. Preys S. L'expérience d'Ondalys dans la formation continue aux outils opérationnels de la chimiométrie et du machine learning. 2019;
152. Rayaleh WE. Extraction des connaissances en imagerie microspectrométrique par analyse chimiométrique. Application à la caractérisation des constituants d'un calcul urinaire. université des sciences et technologies de Lille; 2006.
153. Black KM, Law H, Aldoukhi A, Deng J, Ghani KR. Deep learning computer vision algorithm for detecting kidney stone composition. BJU Int. juin 2020;125(6):920-4.
154. Haouchine M. Développement d'outils de chimiométrie pour le suivi de contamination aux composés aromatiques polycycliques dans des matrices environnementales complexes. Ecole doctorale Sciences et Ingénierie des Ressources Naturelles - SIRENA; 2023.
155. Cyril Ruckebusch. Résolution et modélisation chimiométrique en spectroscopie moléculaire. ResearchGate [Internet]. [cité 24 mai 2025]; Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/30516660_Resolution_et_modelisation_chimiometrique_en_spectroscopie_moleculaire
156. Matthias Otto. What is Chemometrics? In: Chemometrics [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2024 [cité 24 mai 2025]. p. 1-13. Disponible sur: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527843800.ch1
157. Cocchi M. Chemometrics for Food Quality Control and Authentication. In: Encyclopedia of Analytical Chemistry [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2017 [cité 24 mai 2025]. p. 1-29. Disponible sur: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470027318.a9579
158. Kenneth R. Beebe, Randy J. Pell, Mary Beth Seasholtz. Chemometrics: A Practical Guide [Internet]. 1998 [cité 24 mai 2025]. 360 p. Disponible sur: https://www.wiley.com/en-us/Chemometrics%3A+A+Practical+Guide-p-9780471124511

159. Wang HP, Chen P, Dai JW, Liu D, Li JY, Xu YP, et al. Recent advances of chemometric calibration methods in modern spectroscopy: Algorithms, strategy, and related issues. TrAC Trends in Analytical Chemistry. 1 août 2022;153:116648.
160. Rinaldi CA, Boggio N, Vorobioff J. How Chemometrics Allowed the Development of LIBS in the Quantification and Detection of Isotopes: A Case Study of Uranium. In: Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2023 [cité 24 mai 2025]. p. 277-86. Disponible sur: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119758396.ch13
161. Gariso R, Coutinho JPL, Rato TJ, Reis MS. A comparative analysis of deep learning and chemometric approaches for spectral data modeling. Analytica Chimica Acta. 15 avr 2025;1347:343766.
162. Zhang W, Kasun LC, Wang QJ, Zheng Y, Lin Z. A Review of Machine Learning for Near-Infrared Spectroscopy. Sensors. janv 2022;22(24):9764.
163. Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd éd. Springer-Verlag; 2017. 763 p.
164. Matthias Otto. Modeling. In: Chemometrics [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2024 [cité 24 mai 2025]. p. 231-94. Disponible sur: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527843800.ch6
165. De Rivas BL, Vivancos JL, Ordieres-Meré J, Capuz-Rizo SF. Determination of the total acid number (TAN) of used mineral oils in aviation engines by FTIR using regression models. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. janv 2017;160:32-9.
166. Montgomery DC, Peck EA, Vining GG. Introduction to Linear Regression Analysis. Fifth Edition. Canada: John Wiley & Sons, Inc; 2021.
167. Dormann CF, Elith J, Bacher S, Buchmann C, Carl G, Carré G, et al. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. Ecography. 2013;36(1):27-46.
168. Matthias Otto. Basic Statistics. In: Chemometrics [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2024 [cité 24 mai 2025]. p. 15-59. Disponible sur: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527843800.ch2
169. Eriksson L, Toft M, Johansson E, Wold S, Trygg J. Separating Y-predictive and Y-orthogonal variation in multi-block spectral data. Journal of Chemometrics. 2006;20(8-10):352-61.
170. Tr T. Dimensionality Reduction: A Comparative Review. 2009;36.
171. Jolliffe IT, Cadima J. Principal component analysis: a review and recent developments. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 13 avr 2016;374(2065):20150202.
172. Éric Lacourse, Véronique Dupère. Algorithmes d'apprentissage et modèles statistiques: Un exemple de régression régularisée et de validation croisée pour prédire le décrochage. In: ResearchGate [Internet]. 2020 [cité 24 mai 2025]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/344930028_Algorithmes_d'apprentissage_et_modeles_statistiques_Un_exemple_de_regression_regularisee_et_de_validation_croisee_pour_predire_le_decrochage_scolaire_disponible_a_httpsosfioydxva_annotated_R_code_in_f

173. Stone L. Assessing kidney stone composition using deep learning. Nat Rev Urol. avr 2020;17(4):192-3.
174. Day PL, Erdahl S, Rokke DL, Wieczorek M, Johnson PW, Jannetto PJ, et al. Artificial Intelligence for Kidney Stone Spectra Analysis: Using Artificial Intelligence Algorithms for Quality Assurance in the Clinical Laboratory. Mayo Clin Proc Digit Health. mars 2023;1(1):1-12.
175. LALAOUNA Abd El Djalil abdeldjalil. ANALYSE CHIMIOMETRIQUE MULTIVARIEE DES DONNEES CHIMIQUES ET INSTRUMENTALES * Applications au contrôle de qualité des médicaments * [DESM]. [CONSTANTINE]: UNIVERSITE SALAH BOUBNIDER CONSTANTINE 3; 2019.
176. European pharmacopoeia 9.0. Strasbourg: EDQM/Council of Europe [Internet]. 2016 [cité 24 mai 2025]. Disponible sur: https://www.edqm.eu/en/european-pharmacopoeia
177. Durand A. Méthodes de sélection de variables appliquées en spectroscopie proche infrarouge pour l'analyse et la classification de textiles.
178. Rosipal R, Krämer N. Overview and recent advances in partial least squares. In: Proceedings of the 2005 international conference on Subspace, Latent Structure and Feature Selection [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2005 [cité 24 mai 2025]. p. 34-51. (SLSFS'05). Disponible sur: https://doi.org/10.1007/11752790_2
179. Robert R. Sokal, F. James Rohlf. Biométrie : principes et pratique des statistiques en recherche biologique [Internet]. QUATRIÈME ÉDITION. États-Unis d'Amérique: W. H. Freeman et compagnie; 2013 [cité 24 mai 2025]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/44554870_Biometry_the_principles_and_practice_of_statistics_in_biological_research_Robert_R_Sokal_and_F_James_Rohlf
180. Inferential Statistics. In: Statistics from A to Z [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2016 [cité 24 mai 2025]. p. 212-9. Disponible sur: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119272021.ch8
181. Bettany-Saltikov J, Whittaker VJ. Selecting the most appropriate inferential statistical test for your quantitative research study. Journal of Clinical Nursing. 2014;23(11-12):1520-31.
182. Fabio Sani, John Todman. Selecting a Statistical Test. In: Experimental Design and Statistics for Psychology [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2006 [cité 24 mai 2025]. p. 86-99. Disponible sur: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470776124.ch6
183. Wold S, Esbensen K, Geladi P. Principal component analysis. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 1 août 1987;2(1):37-52.
184. Wenwen Zhang, Liyanaarachchi Chamara Kasun, Qi Jie Wang, Yuan Jin Zheng, Zhiping Lin. Une revue de l'apprentissage automatique pour la spectroscopie proche infrarouge [Internet]. 2022 [cité 24 mai 2025]. Disponible sur: https://www.mdpi.com/1424-8220/22/24/9764
185. Roger JM, Ecarnot M. Grain3_ACP1. 2019;20.
186. Pattern Recognition and Classification. In: Chemometrics [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2024 [cité 24 mai 2025]. p. 145-229. Disponible sur: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527843800.ch5

187. Wold S, Sjöström M, Eriksson L. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 28 oct 2001;58(2):109-30.
188. Dominique DESBOIS. INTRODUCTION A LA REGRESSION DES MOINDRES CARRES PARTIELS AVEC LA PROCEDURE PLS DE SAS. :58.
189. Arthur E. Hoerl, Robert W. Kennard. Ridge Regression: Biased Estimation for Nonorthogonal Problems. ResearchGate [Internet]. [cité 24 mai 2025]; Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/221996166_Ridge_Regression_Biased_Estimation_for_Nonorthogonal_Problems
190. Djemaï Samia, Belkacem Brahmi, Mohand Ouamer Bibi. Méthode primale-duale pour l'apprentissage des SVM. In 2014 [cité 24 mai 2025]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/308334586_Methode_primale-duale_pour_l'apprentissage_des_SVM
191. Méthodes de Chimiométrie et Machine Learning. Ondalys [Internet]. [cité 24 mai 2025]; Disponible sur: https://ondalys.fr/ressources-scientifiques/methodes-de-machine-learning/
192. Matthias Otto. Signal Processing and Time Series Analysis. In: Chemometrics [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2016 [cité 24 mai 2025]. p. 55-91. Disponible sur: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527699377.ch3
193. Tibshirani R. Regression Shrinkage and Selection Via the Lasso. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological). 1996;58(1):267-88.
194. Tibshirani R. Regression shrinkage and selection via the lasso: a retrospective. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology). 2011;73(3):273-82.
195. Wang H, Li G, Tsai CL. Regression coefficient and autoregressive order shrinkage and selection via the lasso. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology). 2007;69(1):63-78.
196. Breiman L. Random Forests. Machine Learning. 1 oct 2001;45(1):5-32.
197. Daniel WW, Cross CL. Biostatistics: A Foundation for Analysis in the Health Sciences.
198. Merabet DH, Reguig KB. Epidemiological Study: Research of Urolithiasis in Those with Metabolic Syndrome in Western of Algeria. International Journal of Prevention and Treatment. 2016;5(3):39-45.
199. Sekkoum K, Djellouli HM, Belkboukhari N, Taleb S. Lithiase urinaire du Sud Ouest Algérien : A propos de la composition des calculs en zone semi-aride. 2012;4.
200. Siener R, Rüdy J, Herwig H, Schmitz MT, Schaefer RM, Lossin P, et al. Mixed stones: urinary stone composition, frequency and distribution by gender and age. Urolithiasis. 8 janv 2024;52(1):24.
201. Abid N, Lemoine S, Roger C, Badet L, Machon C. Étude épidémiologique observationnelle de 4294 dossiers de calculs urinaires analysés sur un CHU. Progrès en Urologie. nov 2017;27(13):748.
202. Ye Z, Zeng G, Yang H, Li J, Tang K, Wang G, et al. The status and characteristics of urinary stone composition in China. BJU International. juin 2020;125(6):801-9.
203. Daudon M, Dessombz A, Frochot V, Letavernier E, Haymann JP, Jungers P, et al. Comprehensive morpho-constitutional analysis of urinary stones improves etiological diagnosis and therapeutic strategy of nephrolithiasis. Comptes Rendus Chimie. 1 nov 2016;19(11):1470-91.

204. Bouslama S, Boutefnouchet A, Hannache B, Djemil T, Kadi A, Dahdouh A, et al. Détermination de la composition de 359 calculs du haut appareil urinaire collectés dans la région Est-algérien. Progrès en Urologie. janv 2016;26(1):41-9.
205. METTLER TOLEDO. Thermal Decomposition of Copper Sulfate Pentahydrate [Internet]. [cité 24 juin 2025]. Disponible sur: https://www.mt.com/fr/fr/home/supportive_content/matchar_apps/MatChar_UC156.html
206. Valido IH, Rius-Bartra JM, Boada R, Resina-Gallego M, Valiente M, López-Mesas M. Characterization of Calcium Oxalate Hydrates and the Transformation Process. ChemPhysChem. 17 nov 2020;21(22):2583-93.
207. Manzoor MAP, Mujeeburahiman M, Rekha PD. Electron probe micro-analysis reveals the complexity of mineral deposition mechanisms in urinary stones. Urolithiasis. avr 2019;47(2):137-48.
208. Asyana V, Haryanto F, Fitri LA, Ridwan T, Anwary F, Soekersi H. Analysis of urinary stone based on a spectrum absorption FTIR-ATR. J Phys: Conf Ser. mars 2016;694:012051.
209. Petit I, Belletti GD, Debroise T, Llansola-Portoles MJ, Lucas IT, Leroy C, et al. Vibrational Signatures of Calcium Oxalate Polyhydrates. ChemistrySelect. 23 août 2018;3(31):8801-12.
210. Conti C, Casati M, Colombo C, Possenti E, Realini M, Gatta GD, et al. Synthesis of calcium oxalate trihydrate: New data by vibrational spectroscopy and synchrotron X-ray diffraction. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. nov 2015;150:721-30.
211. Selvaraju R, Raja A, Thiruppathi G. FT-IR spectroscopic, thermal analysis of human urinary stones and their characterization. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. févr 2015;137:1397-402.
212. Leroy C. Oxalates de calcium et hydroxyapatite: des matériaux synthétiques et naturels étudiés par techniques RMN et DNP [Thèse de doctorat]. [Paris]: Université Pierre et Marie Curie; 2017.
213. Bushuev NN, Zinin DS. Thermal decomposition features of calcium and rare-earth oxalates. Russ J Inorg Chem. févr 2016;61(2):161-7.
214. Hourlier D. Thermal decomposition of calcium oxalate: beyond appearances. J Therm Anal Calorim. juin 2019;136(6):2221-9.
215. Madhurambal G, Prabha N, Lakshmi SP, Mojumdar SC. Thermal, UV, FTIR, and XRD studies of urinary stones. J Therm Anal Calorim. mai 2013;112(2):1067-75.
216. Frost RL, Weier ML. Thermal treatment of weddellite—a Raman and infrared emission spectroscopic study. Thermochimica Acta. nov 2003;406(1-2):221-32.
217. Kaloustian J, El-Moselhy TF, Portugal H. Determination of calcium oxalate (mono- and dihydrate) in mixtures with magnesium ammonium phosphate or uric acid: the use of simultaneous thermal analysis in urinary calculi. Clinica Chimica Acta. août 2003;334(1-2):117-29.
218. Zhang J, Li K, Chen H, Hu X, Guo Z, Chen S, et al. Retrospective analysis of urinary tract stone composition in a Chinese ethnic minority colony based on Fourier transform infrared spectroscopy. Sci Rep. 18 août 2023;13(1):13453.

219. Wregg C, Rosenlechner D, Zach V, Eigenfeld M, Stabentheiner E, Ahyai S, et al. FT-IR Spectroscopy Analysis of Kidney Stone Variability in Styria. Crystals. 29 sept 2024;14(10):854.
220. ABBASSENE Fatiha. Etude épidémiologique de la lithiase urinaire [Doctorat en sciences]. [mostaganem]: abdelhamid ibn badis mostaganem; 2019.
221. Materazzi S, Curini R, D'Ascenzo G, Magri AD. TG-FTIR coupled analysis applied to the studies in urolithiasis: characterization of human renal calculi. Thermochimica Acta. oct 1995;264:75-93.
222. D'Ascenzo G, Curini R, De Angelis G, Cardarelli E, Magri A, Miano L. Renal calculi analysis. Application of thermal analytical techniques. Thermochimica Acta. avr 1983;62(2-3):149-69.

ANNEXES

ANNEXE 1: Fiche de renseignement clinique

Fiche de renseignement clinique

Calculs rénaux et urétéraux

La date : ……

MEDECIN PRESCRIPTEUR ET/OU LABORATOIRE PRELEVEUR	
Médecin prescripteur	Laboratoire préleveur
Nom : ……	Nom : ……
Hôpital/service : …… ……	Hôpital ☐ ☐ LBM
Tel : ……	CP : ……ville : ……
Fax : ……	Tel : ……fax : ……

PATIENT	
Nom : ……	Prénom : ……
Date de naissance……	Lieu de naissance : ……
Sexe : H ☐ F ☐	IMC : ……

LOCALISATION DE CALCUL		
☐ Rein	☐ Uretère	☐ Autre

MODE D'ELIMINATION		
☐ Spontané	☐ chirurgical	☐ lithotritie

ELIMINATION DE CALCUL ENTIER	
☐ Oui	☐ Non

HISTORIQUE DE LA LITHIASE		
☐ 1ère Calcul	☐ Récidive	☐ Anomalie des voies excrétrices

TRAITEMENT EN COURS(en rapport ou non avec la lithiase)
…… ……

ANOMALIES METABOLIQUES CONNUS	
☐ Oui	☐ Non

INFECTIONS URINAIRES CONNUES	
☐ Oui	☐ Non

ANNEXE 1. Fiche de renseignement clinique (suite)

REGIME ALIMENTAIRE							
Aliments	Non	+1 fois/jr	1 fois/jr	4-5 fois/Sem	2-3 fois/Sem	1 fois/Sem	1 Fois/15jr
Lait							
Fromage (portion)							
Yaourt (pots)							
Chocolat (morceaux)							
Epinards							
Betteraves							
Tomates							
Légumes sec							
Œufs							
Sucreries							
Salés (en excès) (chips, olives)							
Fruits							
Viandes							
Abats							
Thés vert							
Boissons sodés							

BILAN BIOLOGIQUE											
	Gly	Urée	Créat	Ca	Mg	PO4	Ac.uri	PTH	Na+	UCBU	Autres
Sang											
urine											
volume											

ANNEXE 2 : Liste des composés de référence utilisés pour l'analyse spectroscopique et thermique, avec leurs noms chimiques et fournisseurs

Composé	Nom chimique (IUPAC ou courant)	Fournisseurs
Oxalate de calcium monohydraté	Calcium oxalate monohydrate ($CaC_2O_4 \cdot H_2O$)	Sigma-Aldrich
Oxalate de calcium dihydraté	Calcium oxalate dihydrate ($CaC_2O_4 \cdot 2H_2O$)	Sigma-Aldrich
Acide urique anhydre	Acide urique ($C_5H_4N_4O_3$)	Sigma-Aldrich
Acide urique dihydraté	Acide urique dihydraté ($C_5H_4N_4O_3 \cdot 2H_2O$)	Sigma-Aldrich
Carbapatite	Hydroxyapatite carbonatée ($Ca_{10}(PO_4)_6(CO_3)(OH)_2$)	Sigma-Aldrich
Struvite	Phosphate de magnésium et d'ammonium hexahydraté ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$)	Sigma-Aldrich
Brushite	Phosphate bicalcique dihydraté ($CaHPO_4 \cdot 2H_2O$)	Sigma-Aldrich
Calcite	Carbonate de calcium ($CaCO_3$)	Sigma-Aldrich
Cystine	Acide aminé soufré ($C_6H_{12}N_2O_4S_2$)	Sigma-Aldrich
Amoxicilline trihydratée	Amoxicilline trihydratée ($C_{16}H_{19}N_3O_5S \cdot 3H_2O$)	Sigma-Aldrich
Urate acide d'ammonium anhydre	Urate acide d'ammonium ($NH_4C_5H_3N_4O_3$)	Sigma-Aldrich

ANNEXE 3 : Matériels utilisés.



Figure 144 : loupe binoculaire type Stemi DRC ZEISS® 350 (laboratoire de chimie analytique)

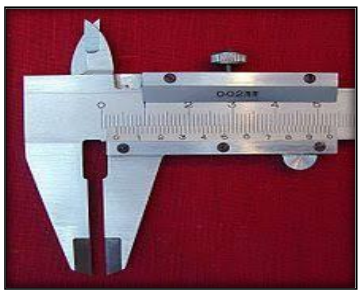


Figure 145 : Pied à coulisse

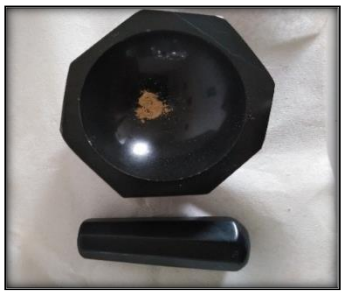


Figure 143 : Mortier et pilon en agate.

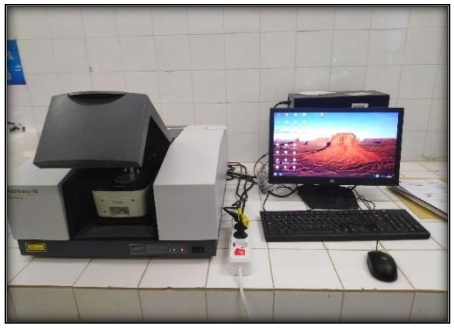


Figure 147 : Spectromètre infrarouge a transformé de Fourier type IRAffinity-1S SHIMADZU® (plateforme de faculté de médecine d'Annaba)



Figure 146 : Accessoires ATR type QUEST – SPERAC (plateforme de faculté de médecine d'Annaba)



Figure 148 : Analyseur thermique SETARM LABSYS evo -plate-forme faculté de médecine Annaba-

ANNEXE 4 : Données cliniques des patients.

Colonne1	PATIENT				LOCALISATION DU CALCUL	HISTORIQUE DE LA LITHIASE	Anomalie des vois excretrices	ANOMALIE METABOLIQUE			INFECTION URINAIRE CONNUE		PRISE DE MEDICAMENT
Les patients	sexe	age	région	IMC				oui/non	Type d'anomalies		oui	type	
PATIENT 1	1	55	1	30	2	1	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 2	1	44	1	24	3	2	0	1	HYPERPARATHYROIDIE laire	4	0	/	/
PATIENT 3	1	24	1	25,3	1	2	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 4	1	40	1	/	1	2	0	0	/	0	1	streptococcus spp	/
PATIENT 5	2	54	4	/	3	1	0	0	/	0	1	E COLI	/
PATIENT 6	2	52	4	29,1	1	2	0	1	HYPERPARATHYROIDIE laire	4	0	/	/
PATIENT 7	2	59	5	/	1	2	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 8	2	42	1	15	1	2	0	0	/	0	0	/	complement alimentaire amaigrissant
PATIENT 9	2	42	1	16	1	2	0	0	/	0	0	/	complement alimentaire amaigrissant
PATIENT 10	2	42	1	15,5	1	2	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 11	1	40	1	22	1	2	0	1	Diarrhée	6	1	Staphylococcus aureus	/
PATIENT 12	1	40	1	21	1	2	0	1	Diarrhée	6	1	Staphylococcus aureus	/
PATIENT 13	1	30	3	18,5	1	1	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 14	1	74	1	19	1	1	1	1	adenome prostatique+HTA	8+2	0	/	fludex
PATIENT 15	2	51	1	36	2	2	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 16	2	53	1	40	1	2	0	1	DIABETE	1	0	/	glucophage
PATIENT 17	1	38	2	18,5	1	2	0	1	COELIAQUE	7	0	/	/
PATIENT 18	1	47	1	24	1	1	0	1	HYPERTROPHYE DE PROSTATE	8	0	/	PROSTAMED
PATIENT 19	2	48	1	17	3	2	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 20	1	38	1	/	2	1	3	0	/	0	0	/	/
PATIENT 21	1	57	1	25,61	1	2	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 22	2	53	3	/	2	2	0	1	HYPERPARATHYROIDIE laire	4	0	/	/
PATIENT 23	2	57	5	37,9	1	2	0	1	diabete+ GOUTTE	1 + 3	0	/	GLUCOPHAGE
PATIENT 24	1	50	1	35,8	2	2	0	1	DIABETE	1	0	/	metformine
PATIENT 25	1	51	1	/	1	1	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 26	1	29	5	/	3	2	0	1	HYPERPARATHYROIDIE laire	4	0	/	/
PATIENT 27	1	53	3	33,5	2	2	0	1	DIABETE	1	1	klebsiella pneumonie	metformine
PATIENT 28	1	56	1	/	1	1	3	0	/	0	0	/	/
PATIENT 29	1	60	1	24	1	2	2	0	/	0	0	/	/
PATIENT 30	2	33	1	21,4	1	1	0	1	chrohn	6	0	/	/
PATIENT 31	1	52	1	24,2	1	2	0	1	DIABETE phosphaté	14	0	/	/
PATIENT 32	1	48	1	/	1	1	0	0	/	0	0	/	vit c
PATIENT 33	1	46	1	22,9	1	2	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 34	2	45	1	/	3	1	0	0	/	0	1	proteus mirabilis	/
PATIENT 35	1	53	1	/	2	2	0	0	/	0	0	/	vit c
PATIENT 36	2	61	1	38,7	2	1	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 37	1	63	1	18,5	3	2	1	1	QUE MODEREE/ SPLENOMEGALIE	8+2	0	/	/
PATIENT 38	1	50	1	23,14	2	2	0	1	diabète phosphaté	14	0	/	/
PATIENT 39	2	52	1	26	1	2	0	1	polyarthrite rhumatoide	13	0	/	plaquenil larava précontyl
PATIENT 40	1	55	1	34	1	1	0	1	DIABETE	1	0	/	METFORMINE
PATIENT 41	2	64	1	40,1	1	2	0	1	goutte	3	0	/	/
PATIENT 42	1	47	1	28	1	2	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 43	1	50	1	/	1	2	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 44	1	66	1	27,5	2	1	1	1	HTA	2	0	/	fludex
PATIENT 45	1	40	1	/	1	2	0	1	diabète phosphaté	14	0	/	/
PATIENT 46	1	39	1	19,5	2	2	1	0	/	0	0	/	vit c
PATIENT 47	1	52	1	/	1	1	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 48	1	68	1	32,4	3	2	1	1	DIABETE	1	0	/	glucophage
PATIENT 49	2	26	4	20,32	1	1	0	0	/	0	0	/	VIT C
PATIENT 50	2	54	1	25	1	2	1	1	HTA	2	0	/	fludex
PATIENT 51	1	50	1	/	1	1	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 52	1	35	1	26	1	2	0	1	CROHN	6	0	/	/
PATIENT 53	1	35	1	23	1	2	0	1	CHRON	6	0	/	/
PATIENT 54	2	44	1	28,5	3	2	0	1	HTA	2	0	/	losartan
PATIENT 55	1	46	1	/	1	1	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 56	2	49	1	33,16	2	2	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 57	1	64	1	38	1	2	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 58	2	62	1	25	2	2	0	1	DIABETE	1	0	/	metformine
PATIENT 59	1	38	1	/	1	1	0	0	/	0	0	/	vit c - vit d
PATIENT 60	1	47	1	/	2	2	0	1	DIABETE/ HTA	1+2	0	/	fludex glucophage

ANNEXE 4. Données cliniques des patients (suite).

PATIENT 61	1	66	2	/	1	1	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 62	2	5	1	/	1	2	0	1	+NEPHROCALCINOSE CONGENITA	9+ 10 +11	0	/	/
PATIENT 63	1	40	1	29,1	2	2	0	0	DIABETE	1	0	/	glucophage
PATIENT 64	2	72	1	23,32	2	2	0	1	Diabète /HTA	1+2	0	/	fludex glucophage
PATIENT 65	1	48	1	26	3	2	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 66	1	68	1	28,61	1	2	0	1	diabète	1	1	E COLI	METFORMINE
PATIENT 67	2	70	1	/	1	1	0	1	HTA	2	0	/	FLUDEX
PATIENT 68	2	41	2	/	1	2	0	1	HYPERPARATHYROIDIE laire	4	0	/	/
PATIENT 69	2	68	1	25	1	1	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 70	1	54	2	/	3	2	1	1	hypertrophie prostatique	8	1	streptococcus spp	PROSTAMED
PATIENT 71	1	60	1	23,11	2	2	0	1	HTA Diabète	1+2	0	/	fludex METFORMINE
PATIENT 72	2	43	3	/	3	2	0	1	HYPERPARATHYROIDIE laire	4	0	/	/
PATIENT 73	1	37	4	26,34	1	1	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 74	2	53	1	32,5	3	2	0	0	/	0	1	/	/
PATIENT 75	1	47	2	24,12	1	1	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 76	2	33	5	/	2	1	0	1	diabète	1	0	/	metformine
PATIENT 77	2	34	2	23,5	3	1	0	0	/	0	1	E COLI	/
PATIENT 78	2	39	1	/	1	1	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 79	2	46	1	35	2	2	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 80	2	49	1	33	1	2	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 84	2	45	1	28	1	2	0	1	COELIAQUE	7	0	/	/
PATIENT 82	1	44	1	20,5	1	1	0	0	/	0	0	/	VIT C
PATIENT 83	1	60	1	/	2	2	3	0	/	0	0	/	/
PATIENT 84	1	23	3	20	1	1	0	0	/	0	0	/	vit d vit c
PATIENT 85	1	37	3	27	1	2	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 86	2	26	1	20,66	3	2	0	0	/	0	1	E COLI	/
PATIENT 87	1	56	1	/	1	1	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 88	2	48	1	28,8	1	2	0	0	/	0	0	/	CALCIUM VIT D
PATIENT 89	2	46	1	24,2	1	2	0	1	HYPERPARATHYROIDIE laire	4	0	/	/
PATIENT 90	2	39	1	/	1	1	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 91	1	64	1	24,8	1	2	3	0	/	0	0	/	/
PATIENT 92	1	58	1	30,1	1	1	0	0	/	0	0	/	0
PATIENT 93	2	33	1	/	3	1	0	0	/	0	1	proteus mirabilis	/
PATIENT 94	1	50	2	/	2	2	3	0	/	0	0	/	/
PATIENT 95	2	37	1	23,4	2	1	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 96	1	46	1	/	1	2	0	1	diabète phosphaté	14	0	/	/
PATIENT 97	1	45	1	22	2	2	0	1	HYPERPARATHYROIDIE laire	4	0	/	/
PATIENT 98	2	45	1	29	1	1	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 99	2	53	1	30	1	2	0	0	/	0	0	/	CALCIUM VIT D
PATIENT 100	1	54	1	/	1	2	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 101	1	64	1	25	1	2	0	1	diabète prostate CHROHN	6	0	/	novaformine prostamed tamsomed
PATIENT 102	1	44	1	26,1	2	2	0	0	/	0	0	/	/
PATIENT 103	2	51	2	32	1	2	0	1	COELIAQUE	7	0	/	VIT D
PATIENT 104	1	42	1	28,6	1	1	0	0	/	0	0	/	maalox
PATIENT 105	2	57	1	31	2	2	0	0	0	0	0	/	calcium / vit d

ANNEXE 5 : Habitudes alimentaires des patients.

Colonne1	REGIME ALIMENTAIRE																
Les patients	lait	fromage	yaourt	chocolat	epinard	betteraves	tomates	legumes sec	oeufs	sucreries	salés	fruits	viandes	abats	thés vert	Boissons sodés
PATIENT 1	3	2	0	1	0	0	3	1	5	3	5	4	6	3	0	6
PATIENT 2	4	3	2	2	0	2	2	2	2	2	1	4	3	1	2	2
PATIENT 3	6	6	5	4	1	2	5	4	5	5	4	2	4	3	1	5
PATIENT 4	6	4	4	1	1	1	4	4	4	5	3	3	3	1	2	4
PATIENT 5	5	4	3	5	3	4	4	4	4	4	3	3	4	1	2	6
PATIENT 6	5	3	3	1	2	3	5	4	3	3	1	2	4	1	2	5
PATIENT 7	5	4	3	3	1	3	4	3	4	4	4	2	4	1	2	5
PATIENT 8	5	1	1	0	0	3	2	2	2	0	0	3	1	0	1	1
PATIENT 9	3	1	1	1	2	2	1	2	1	0	0	2	1	1	0	0
PATIENT 10	4	1	1	1	1	2	2	2	2	0	0	3	1	0	1	0
PATIENT 11	5	3	3	3	1	3	5	2	2	2	2	3	2	1	2	4
PATIENT 12	0	2	0	3	1	2	5	2	3	2	1	3	3	1	2	4
PATIENT 13	6	5	5	1	1	1	2	1	4	4	4	2	4	1	2	6
PATIENT 14	5	0	0	1	1	3	5	4	3	1	0	3	4	2	3	5
PATIENT 15	5	3	3	4	3	4	5	4	3	2	4	2	3	1	3	6
PATIENT 16	5	1	1	2	1	2	3	3	3	1	2	2	3	2	0	3
PATIENT 17	5	2	3	1	0	0	2	1	2	2	0	3	2	1	1	2
PATIENT 18	0	2	1	4	1	3	5	4	4	3	2	3	3	0	5	3
PATIENT 19	0	3	0	0	0	2	4	1	3	0	0	3	1	1	1	0
PATIENT 20	3	2	1	2	1	3	4	4	4	2	2	2	3	1	3	3
PATIENT 21	0	3	0	3	2	4	5	4	3	3	2	4	4	3	5	3
PATIENT 22	5	3	3	2	2	3	4	4	4	4	2	4	3	0	2	5
PATIENT 23	5	2	2	1	1	2	3	3	2	0	3	4	2	1	0	5
PATIENT 24	5	2	2	1	1	1	3	2	3	1	3	4	4	2	0	6
PATIENT 25	0	1	0	1	2	4	5	4	4	2	1	4	6	3	6	3
PATIENT 26	4	3	2	2	1	1	2	3	3	3	1	3	3	1	2	5
PATIENT 27	4	4	2	1	1	2	2	2	3	0	4	5	3	2	2	4
PATIENT 28	5	2	2	3	2	3	3	4	3	3	2	3	4	1	3	3
PATIENT 29	5	2	0	3	2	3	4	4	4	3	2	3	4	1	4	4
PATIENT 30	4	5	0	5	3	3	5	3	3	3	2	4	3	3	0	0
PATIENT 31	5	4	3	4	2	3	4	3	4	2	2	2	2	1	4	5
PATIENT 32	5	3	2	2	1	3	4	4	4	2	2	3	3	3	2	3
PATIENT 33	3	0	0	3	1	5	5	4	5	3	1	5	4	2	5	4
PATIENT 34	4	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	4	2	1	2	5
PATIENT 35	5	2	3	3	1	1	5	3	3	2	1	5	3	1	2	3
PATIENT 36	5	4	1	2	1	1	3	2	5	3	3	4	6	4	3	6
PATIENT 37	5	2	1	1	2	3	5	3	1	2	0	5	5	0	4	4
PATIENT 38	4	3	1	2	2	3	3	2	3	4	2	4	3	1	2	4
PATIENT 39	5	2	3	2	1	2	5	3	3	3	2	1	2	1	2	3
PATIENT 40	4	3	2	0	0	3	3	3	2	0	2	4	3	1	2	4
PATIENT 41	5	2	3	2	1	2	5	2	4	2	2	1	2	1	2	5
PATIENT 42	3	4	0	4	1	4	5	5	4	3	2	4	4	3	5	4
PATIENT 43	4	3	2	2	4	5	4	5	4	3	4	3	4	1	5	5
PATIENT 44	5	3	2	2	1	3	5	3	4	2	2	4	4	3	2	5
PATIENT 45	0	3	0	0	2	4	5	5	4	4	3	2	4	1	5	5
PATIENT 46	5	3	2	3	2	2	5	4	2	3	1	5	2	1	5	3
PATIENT 47	0	4	0	4	2	4	5	5	5	3	2	3	4	3	5	3
PATIENT 48	5	4	3	1	2	2	3	1	2	1	2	4	5	3	1	4
PATIENT 49	5	3	1	4	2	3	3	2	3	3	1	4	4	2	0	0
PATIENT 50	0	2	0	3	3	4	5	5	2	0	0	2	3	1	3	3
PATIENT 51	3	4	3	4	2	4	5	4	4	4	4	2	5	2	5	6
PATIENT 52	0	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	2	3	3
PATIENT 53	0	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	2	3	3
PATIENT 54	4	3	2	3	2	3	4	2	3	2	2	4	4	2	1	4
PATIENT 55	0	3	0	3	2	5	5	4	4	2	2	3	4	1	4	3
PATIENT 56	5	3	2	2	1	2	3	2	5	3	4	4	6	3	3	6
PATIENT 57	4	1	3	1	1	1	4	2	4	2	3	3	4	2	3	5
PATIENT 58	4	3	3	2	2	1	4	2	4	1	3	4	4	3	2	5
PATIENT 59	5	4	0	5	2	4	5	3	3	3	3	3	3	2	6	6
PATIENT 60	3	3	1	2	3	4	5	4	2	3	1	3	3	1	6	3
PATIENT 61	0	2	0	2	3	5	5	4	4	2	1	4	4	1	5	3
PATIENT 62	5	3	2	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	0	3
PATIENT 63	6	6	4	0	0	2	5	1	4	4	4	2	4	3	2	6
PATIENT 64	5	1	1	1	1	1	1	1	4	1	3	3	3	1	1	4
PATIENT 65	4	2	1	1	1	1	3	1	4	1	4	4	6	4	2	6
PATIENT 66	5	1	1	2	1	2	2	2	3	0	2	3	4	1	1	6
PATIENT 67	5	2	1	3	3	5	5	4	3	2	0	5	3	1	4	3
PATIENT 68	5	3	3	3	2	2	4	3	3	4	2	3	3	2	2	6
PATIENT 69	0	3	0	2	3	5	5	4	3	2	0	5	4	2	1	5
PATIENT 70	0	3	0	2	2	3	3	4	3	3	3	3	3	2	4	3
PATIENT 71	5	0	0	0	1	1	1	2	5	1	3	3	5	2	1	4
PATIENT 72	3	2	1	2	2	3	4	4	2	2	2	2	1	1	3	3
PATIENT 73	5	3	2	6	2	4	5	4	4	5	4	4	4	2	5	6
PATIENT 74	0	3	3	1	0	1	1	1	5	2	3	5	6	3	0	5
PATIENT 75	5	2	0	5	2	4	6	4	3	5	2	3	3	1	5	5
PATIENT 76	5	3	1	2	3	5	5	4	3	1	3	3	2	0	5	5
PATIENT 77	5	4	2	2	0	1	3	2	3	4	2	3	3	2	1	4
PATIENT 78	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

ANNEXE 5. Habitudes alimentaires des patients (suite).

PATIENT 79	5	3	1	3	2	5	6	4	3	0	2	4	3	1	4	2
PATIENT 80	5	2	2	3	2	4	5	5	4	3	2	3	4	2	3	3
PATIENT 84	5	3	2	2	1	2	3	2	3	2	0	4	3	1	1	3
PATIENT 82	5	3	2	2	2	4	5	4	3	4	3	3	3	2	5	4
PATIENT 83	5	2	2	2	2	3	5	4	3	2	2	3	4	1	4	3
PATIENT 84	5	5	2	5	1	4	5	3	2	3	1	2	2	2	5	6
PATIENT 85	6	5	4	1	2	4	4	4	4	5	3	2	4	2	6	6
PATIENT 86	5	3	2	2	1	2	2	2	3	4	2	2	2	2	1	2
PATIENT 87	5	3	2	2	1	1	3	3	5	3	2	5	6	5	6	3
PATIENT 88	4	3	2	4	1	2	3	3	3	3	2	2	2	1	4	4
PATIENT 89	0	2	1	2	1	3	5	3	3	4	3	4	3	1	2	6
PATIENT 90	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
PATIENT 91	3	3	2	2	1	3	4	3	3	2	3	3	2	2	3	3
PATIENT 92	4	2	1	1	1	1	1	1	5	2	3	5	6	3	0	6
PATIENT 93	4	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	4	2	1	2	5
PATIENT 94	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
PATIENT 95	5	3	2	3	2	2	2	4	2	2	2	3	3	1	3	3
PATIENT 96	5	3	3	2	2	2	3	2	2	3	2	2	2	1	0	4
PATIENT 97	5	4	4	2	1	3	3	3	4	4	2	3	4	1	1	6
PATIENT 98	5	5	4	2	1	3	3	3	4	4	2	3	4	1	1	6
PATIENT 99	5	3	2	5	3	5	6	4	4	5	3	3	4	1	3	6
PATIENT 100	0	2	0	3	2	4	5	4	3	2	2	3	2	1	6	3
PATIENT 101	3	4	2	1	1	1	5	2	3	3	1	5	3	3	1	5
PATIENT 102	3	2	0	2	2	4	5	4	4	3	3	2	3	1	4	5
PATIENT 103	5	4	3	2	1	2	3	3	3	3	1	3	3	1	1	4
PATIENT 104	5	3	2	2	2	2	4	3	2	2	0	2	3	1	0	3
PATIENT 105	6	4	3	2	1	2	3	2	4	4	3	3	5	1	2	5

ANNEXE 6 : Données biologiques des patients.

gly Sg (g/l)	gly UR (g/24h)	urée Sg (g/l)	urée UR (mmol/24h)	créat Sg (mg/l)	créat UR (mg/24h)	Ca Sg (mg/l)	Ca UR (mg/24h)	Mg Sg (mg/l)	Mg UR (mg/24h)	PO4 Sg (mg/l)	PO4 UR (mg/24h)	ac urique Sg (mg/l)	ac urique UR (mg/24h)	PTH (pg/ml)	Na+ sg (mEq/l)	Na+ UR (mEq/l)	PROT 24H (g/24h)	densité	diurèse (l)	PH	autres
0,8	0,36	0,22	820	11,6	1253	88,4	290	/	/	41	796	63	950	52	138,5	290	0,061	1,03	0,8	5	TG= 2g/l /choles= elv
0,88	0,29	0,36	649	8,98	1452,3	146,2	422,7	17,1	100,5	22,08	1520	41,6	369	84	140,12	190,4	/	1,02	2,1	6,8	/
0,92	0,11	0,32	512	7,17	1090	102,6	400	17,06	84	37	520	53	820	48	159	257	0,11	1,025	1	5,65	/
0,84	0,26	0,37	624	9 ,23	2013	90	420	21,08	98,45	29	1450	46,01	320	48	146	240,3	0,078	/	1,8	6,2	/
0,89	0,32	0,42	547	12,04	1426	90,34	480	18,47	102	31	1480	38	450	22	147	230	0,09	1,03	0,85	6,5	vit D = 17 ng/ml
0,79	0, 18	0,28	710	13,05	1156	150	416,7	13,67	73,2	20	1305	71	820	80	138	160	0,06	1,025	1,65	6	/
1,8	0,75	0,3	750	10,2	1076	85	350,1	14,06	72,7	38 ,2	487,6	67,32	784,6	19	147	280	0,11	1,02	1,2	5,8	/
0,77	/	0,28	/	12,23	/	56 ,22	323	17,6	84,7	14	1350	90	350	62	136	189	0,09	1,02	2	8	/
0,75	0,41	0,32	524	11,67	1326,24	58,1	300	16,6	92,33	24	1400	78,6	625	61	139	210	/	1,02	1,9	7,8	/
0,8	0,32	0,44	/	12,86	/	86,7	320	17	/	17,5	1420	76	655	61,6	142	194	0,12	1,025	2,2	/	/
1,01	/	0,41	650	9,75	2023	86,98	310,5	/	/	17	1620	73	750	58,2	/	242	/	1,025	2,3	8,5	/
0,87	0,36	0,37	/	10,11	/	86,5	308,86	13,2	67	20,5	1560	72,5	7230	47	/	235	0,14	/	1,89	/	/
0,89	/	0,2	/	14	/	103	550	9.3	62,4	/	/	59	990	19	/	/	0,099	1,02	1,2	5,5	vitD12,1 ng/ml
1,01	0,4	0,4	/	13,47	1100	90	193	15	/	27,01	916	80	950	45	147,1	234	0,102	1,025	1,29	5,3	TPSA=5,16 ng/ml
0,83	/	0,17	610	16	1900	87,4	437,76	19,03	82,6	25	1294,56	43,54	475	37,07	/	/	0,046	1,02	1,76	6	/
2,21	0,8	0,29	664	10,62	/	89,2	290 ,3	15,22	121	27	698,5	70 ,02	142,22	/	/	/	/	/	1,5	/	/
0,98	0,37	0,27	540,06	12,54	1768	71,83	88,14	11,6	68,01	38,66	1280,02	43,33	250,3	28,8	130	23	0,04	1,02	1,7	6	vitD=14 ng/ml / Ac anti transglutaminase I
1,02	0,41	0,23	460	12,46	1954	87,1	/	15,02	/	41	543 ,47	47,3	812	21,6	147	231	0,043	1,03	3	6,3	TPSA =2,94 ng/ml
0,78	/	0,36	/	10,66	/	69	310 ,33	14	70,42	/	1461,8	81	450	58,6	/	/	/	/	2,3	/	/
1,03	/	0,44	/	11,62	/	87	107	/	/	44	916	59	468	/	/	180	/	1,03	2	6,1	/
0,86	0,39	0,32	680	10,46	1267	62,67	50,21	22,21	81,06	44,42	350,23	61,44	980,7	47,1	145,4	204	0,045	1,025	1	5,5	/
1,06	0,47	0,44	613	11,14	1097	127,8	490	19,86	82,13	20,7	1824,2	48,9	310,4	87,6	/	187	0,095	/	1,93	6,5	/
2,45	0,84	0,46	702	11,8	1984,22	98,9	300	16,7	130,1	31,52	425,01	105,1	862,4	56,4	142,8	240	0,03	1,025	1,7	5,5	TG= 2,1 g/l / cholesterol = 2,9 g/l crp 12
1,46	0,6	0,23	623	9,45	2027	97,8	259	14,16	127,2	27,13	729,45	73,04	187	35,6	140,6	274	0,14	1,03	1,2	4,5	cholest =3 g/l / TG= 2,5 g/l
1,1	0,45	0,38	826	14	2476,18	90,4	25 0	19,46	/	26,34	350,84	78	950	64,6	152	230	0,257	1,02	2,3	5,5	vitD= 19,70 ng/ml
0,77	/	0,19	/	11,7	/	122	345,6	25,11	87,6	45	2504	39,9	381,2	102	137	74 ,6	/	/	2,2	6,8	/
1,69	0,7	0,43	640	12,29	2251	94,41	280	/	/	29,64	591	69,03	165,1	36,7	146	285	0,14	1,03	1,42	5,5	/
0,74	/	0,26	/	9,88	/	100	320	11	62	29	1320	54	320	36	/	/	/	1,03	1,7	/	/
0,9	/	/	/	/	/	95	310	13	67	25	1350,54	42	350	23	/	/	/	/	2	/	/
1,02	/	0,24	661	9,58	1712,4	80,1	105,04	12,4	68,4	33	1367,98	72,5	786	59	/	27,7	/	/	1,5	5,8	vit d = 12 ng/ml
1,89	/	0,41	578	11,47	1438	89,9	340,4	16,9	78,7	12,11	1461,8	63,74	560,2	54,8	/	154,4	0,042	1,025	1,23	5,5	/
1,01	0,26	0,31	681	13,87	1687	86,9	82,97	19,4	84,67	29,85	865 ,01	47,5	584	26,5	147	176	0,04	1,02	0,8	5	/
0,95	0,34	0,15	681	12,61	1544	50,44	61,04	18,64	92,33	37,01	1178,6	70,1	770	54	139	210	0,02	1,025	0,93	5,8	vitD= 14,70 ng/ml
0,79	0,26	0,17	498	12,6	1098	88,56	308,83	18,94	78,25	25,36	1412,13	61,6	720,35	19,6	142,21	210,16	0,14	1,03	1,5	7,6	/
1,04	0,401	0,22	512	11,94	1246	100,41	216	/	/	/	/	39,6	312	63,5	136,11	210,14	0,11	1,02	1,5	6,2	/
0,77	0,2	0,33	744	13,44	19423	94,36	300	21,22	111,32	32,4	426	71,84	994,4	51,16	/	300,62	0,09	1,035	1,2	4,5	TG 2,28 g/l / cholest = 2,5 g/l
0,99	0,12	0,28	766	16,07	2074,35	90,07	214,46	/	32,93	34,08	963,04	62,54	1004,81	61,08	140,01	141	0,068	1,03	0,85	5,5	TPSA =6,74 ng/ml
0,85	0,19	0,43	450	11,75	1174	101,8	384	17,88	90,16	11,14	1912,1	59,6	410,95	57,6	141,6	150	0,07	1,025	2	6,5	/
2,6	0,71	0,39	598,66	12,5	1514,48	80,92	95	/	/	21,6	1375,8	47,1	480,95	58,2	/	/	0,095	1,03	2	6	vit d = 15 ng/ml
2,4	0,8	0,24	/	8,93	/	89,1	/	21	125	38	512	70,04	144	28	/	235	/	1,03	1,6	4,8	/
0,98	0,41	0,33	651	11,5	1977	92,6	222,03	19,6	/	32,6	/	100,08	960	/	/	287	0,09	1,03	1,26	4	TG= 2,85g/l / cholest = 3,4 g/l / crp=16
0,91	0,38	0,34	477	10,62	1097	81	70	17,1	75	41,2	1202	48,16	780,6	60,5	138,5	184,3	0,15	1,025	1,57	5,8	vit D =22
1,02	/	0,41	/	13,3	/	101,24	323	12,5	68,6	34	1243,6	71,1	760	53,3	/	/	0,12	1,025	1,3	/	/
0,84	/	0,35	/	20	/	100	/	20,89	/	39,77	/	94,8	842	64,2	/	/	0,205	1,025	1,5	5	/
1,08	0,44	0,27	701	9,47	1246,22	89,6	340,01	/	/	15	1397	6 2,6	820	26	146,1	270	0,095	/	1	5,8	/
0,97	0,31	0,41	688,36	8,88	1189,56	89,5	260,23	16,5	83,4	29	923	70,32	748,3	17,22	147,11	85	0,071	1,03	1,23	5,6	/
0,88	0,27	0,34	597,22	11,67	1087	73,57	97,11	16	75,14	40,11	415	65	786,35	47,7	137,85	219,6	0,13	1,025	0,97	5,3	/
2,3	0,81	0,44	700,57	17	1786,28	102,44	290,6	17,88	122,6	27,5	912	74,8	175,2	20,13	147,6	235	0,16	1,03	1,7	5,6	TG=2,42 g/l / cholest = 2.61 g/l
0,92	0,39	0,34	666 ,24	14,16	1844,86	90,96	162,11	19,24	81,1	29,11	452,33	69,6	878,36	19	144	180	0,11	/	1, 5	6	vitd 11 ng/ml
0,79	/	0,41	266,55	/	11904	83,7	88,13	/	/	42	/	89	860	31,29	/	/	1,89	1,02	2,13	6,5	/
1,06	0,27	0,24	808,39	10,88	1337	100,81	375	/	73,94	20,71	794,6	65,58	760	40,92	136,5	226	0,12	/	1,5	/	vit D= 27,62 ng/ml
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
0,79	/	0,22	/	18	/	102	/	22 ,01	/	36	/	75,4	840	50,05	/	/	0,18	1,03	1,68	4,5	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
0,94	0,33	0,36	874	11,01	1588	87	/	18,5	/	29,9	/	70,7	892	27	/	312	0,1	1,03	1,3	4,8	/
1,03	/	0,42	/	10,66	/	91,7	/	/	/	43,6	/	68	936,7	/	138	219,6	/	1,025	1,6	5,3	TG= 3,2 g/l / choles = 3,27 g/l
1,9	/	0,19	622	9,18	1741,6	102,2	215	17	105	38,31	874	73	152,3	36,3	/	/	/	1,02	1,8	5,5	/
1,1	0,45	0,39	526	12,65	1098	98,01	336	15,11	71,6	33	506	66,12	825	47,56	/	243,8	0,11	/	1,2	5,7	vit d= 35 ng/ml
2,4	0,64	0,45	684,2	13,66	2144	89	100,2	16,58	75,6	32,11	277,35	75,6	1123	32,11	142,5	210,68	0,03	1,01	1	5,5	/
0,89	0,42	0,39	597,6	13,2	1945	74,6	64,44	/	/	28	1080,2	68	750	17,22	/	/	0,045	/	1,1	5,8	/
0,81	/	0,2	/	16	/	91,77	304	/	/	16,43	1866	17,24	/	24,8	123	18	0,1	1,02	1	7	vit D= <8,1 ng/l
1,24	/	0,24	/	7,42	/	98,25	557	10,8	66	26,5	1250,3	60,74	950	33	/	243,2	0,12	/	2	6,5	/
1,8	/	1,04	/	16,09	/	87,06	310	/	/	40,75	472,7	69,45	656,25	52,5	150	236	0,14	/	1	5,2	vit D< 8,1 ng/l
1,05	/	0,36	/	11,2	/	97,68	92	18	87,5	28,2	720	66	1002,01	41	140	310	0,07	1,02	1,5	5	/

ANNEXE 6. Données biologiques des patients (suite).

2,6	0,75	0,44	666,3	13,4	2076	87,4	262,4	18,11	122,5	33,54	480	71,01	172 ,13	19,6	/	235	0,16	/	1,8	5,5	/
1,01	/	0,36	/	11,97	/	88	102	20,1	110,7	42,11	411,6	87	873,03	56	/	/	0,11	1,02	1,5	5,8	/
0,87	0,41	0,39	544	9,18	1786	191	470	17,11	105	23	1300	65	900	105	/	/	0,04	1,025	1,8	5,9	vit d 7 ng/l
0,9	/	0,37	/	8,7	/	67	49,6	22,64	89,6	29,88	811	69,75	389	42,6	/	110,7	0,07	1,02	1,35	6,5	/
0,82	0,44	0,59	874	13,6	2300	89,02	304	10,66	60,6	21,8	1360	70	700	54	/	250	/	1,03	1,47	6,4	/
1,63	/	0,36	794,2	12,99	1185	86,91	306	18,86	102,98	25,05	578	66,38	516	15,4	/	/	/	1,03	1	4,5	/
1,1	/	0,45	/	13,11	/	163	320	22	110,7	26	1350,33	70,32	620	91	139	180	0,12	1,025	2	6,5	/
0,78	/	0,41	/	13,9	/	89,5	114,2	23	112,1	39	405,6	38,6	767	/	141,8	240	0,11	1,025	1	5,5	/
0,85	0,44	0,28	781,2	12,9	1879,6	87,4	226	16,5	120,2	37	788	71,6	933,02	16,9	137	250	0,12	1,03	1,5	4,5	/
1,1	0,28	0,17	478	8,9	1341,5	87,12	109,8	22	95,6	42	490	70,05	740,07	44	142	215	0,15	/	1,4	/	/
2,68	/	0,42	/	11,66	/	87,6	102,2	12,56	60,8	35	410	69,6	198 ,1	/	/	/	0,1	/	1,5	5,8	/
0,97	0,4	0,32	624	/	/	88,2	350,24	14,26	68,22	25	1726,32	44	520	52,33	/	180	/	1,025	2	7	/
0,86	0,47	0,34	710	9,33	1078	97,65	287	11,01	59,6	29,21	257	70,06	820	45	137,6	290,4	0,07	/	1,4	/	/
2,7	0,8	0, 4	476	8,9	1121	58,1	88	9,11	58,5	29,3	405,1	43,6	287	32,2	140,3	210	/	1,02	1,29	/	/
/	/	/	/	/	/	75	84	11,6	68,22	31	524	54,6	760	/	/	/	/	/	/	/	/
0,88	0,42	0,33	620,12	11,4	1803	65,5	240	13,46	69,64	27,5	1252,57	37,05	710,9	28,8	135,4	21,5	0,085	1,025	1,69	5,5	vitD=17 ng/ml / Ac anti transglutaminase I
0,94	0,41	0,39	564	13,6	1245	89,9	105,02	14	74,3	35	490	69,2	740	42,6	145	228,2	0,09	1,03	1,5	/	vitd = 21 ng/l
0,86	/	0,44	/	11,5	/	86	86,3	/	/	36	884	/	813	/	/	/	/	1,03	1,93	/	/
1,01	0,36	0,41	480	13,04	1089	102	362	22	94,03	38,87	461	66	820	62	138	230	/	1,03	1,53	6	vit d = 17 ng/l
0,9	0,31	0,27	756	9,8	1810	109	340	9	61,1	26	1204	65	870	16	141	390	0,07	/	0,9	5	vitD= 11 ng/l
0,79	0,29	0,24	497	12,24	1755,2	117	480	18,6	103,6	27,22	1634	54	324	61	/	/	0,04	1,01	1,92	6,9	vit d clv
1,9	0,67	0,71	811	16,1	2401	87,8	278	17,66	74,1	29,3	364	59	850	33	144	229	0,2	1,01	1,7	5,5	/
0,76	0,24	0,21	463	11,72	1614	99,4	460	16	74,7	31,2	1327	71,03	768,4	47	137,6	219	/	1,02	1,65	6	vit d = 28
0,87	0,43	0,18	511	9,31	1877,64	116	322	24,1	102,3	44	2200	48,16	343	97	136,5	30,1	0,1	1,025	2	7	/
0,91	0,13	0,22	651	13,11	2201	87,62	183	17,6	79,6	36,6	190	64,2	710	36	146	320	0,06	1,025	1,34	5,5	vitd f
1,1	/	0,56	/	15,16	/	86,25	450	16,5	/	35,48	/	47,12	/	31,19	/	/	/	1,03	1,5	5,8	vit d 31,5 ng/l
0,94	0,22	0,42	752	13,6	2023	100,05	244	21,3	121	31,16	914	71,6	1064	52 ,3	147	267	0,11	1,03	1,81	4,5	TG= 2,7 g/l /cholesterol clv
0,79	0,26	0,17	498	12,6	1098	88,56	308,83	18,94	78,25	25,36	1412,13	61,6	720,35	19,6	142,21	210,16	0,14	1,03	1,84	8,2	/
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
0,87	0,34	0,23	712	11,7	1041	89,66	380,63	18,94	78,25	16,36	1412,13	61,6	720,35	19,6	142,21	210,16	0,14	1,03	1,7	6,2	/
1,06	0,44	/	/	/	/	88,9	316	/	/	26	1386 ,14	/	/	/	/	245	0,12	1,03	1,4	6,8	/
0,84	0,41	0,4	/	8,14	/	195,3	474	12	71,06	20,3	1295	66,5	860	95	/	218,1	0,04	1,025	1,9	6	/
0,9	/	0,39	/	9,18	/	195 ,3		13,17	71,01	20,3	1295	69	860	95	/	218,1	0,04	1,025	1,3	6	/
0,96	/	0,28	/	10,35	/	110	420	18,26	/	34,2	1200	64,8	827	43	/	/	/	/	1,5	/	/
0,97	/	0,43	/	11,2	/	53	67	9,6	70,02	36,4	1250	/	/	51	/	/	/	1,025	1,2	6,2	/
1,36	/	/	/	/	/	95,29	/	12,82	/	30,14	/	/	/	33	140,7	/	0,12	1,03	1,25	5,8	vit D =14,4 ng/ml / TG=3,42 g/l
0,87	/	0,37	/	12,5	/	86,9	300,2	/	/	36	750,5	/	/	34	/	/	/	1,025	1,5	6,3	vitD=16 ng/ml
0,78	0,27	0,31	582	13,1	1511,3	100,2	305,25	15	74	35	1264	42,22	700,54	50,02	139,5	20,6	0,023	1,02	1,7	6	Ac anti transglutaminase Ig A +
/	/	/	/	/	/	87	280	/	/	35,2	789	43	854	/	138	215	0,14	/	/	/	/
0,84	/	0,42	/	12,26	/	110,7	550	10,68	68,7	43,12	1300	70,2	800	63	/	234	0,05	/	1,5	5,5	vit d =32ng/ml

ANNEXE 7 : Typage morphologique des lithiases urinaires des patients.

	SURFACE			SECTION			NOYAU
Les patients	zone 1	zone 2	zone 3	interne	profonde 1	profonde 2	
PATIENT 1	32	/	/	/	31	/	/
PATIENT 2	45	/	/	/	/	/	/
PATIENT 3	22	21	/	/	/	/	/
PATIENT 4	21	21+41	/	/	/	/	/
PATIENT 5	21	21+41	22	11+41	22	21+41	41
PATIENT 6	22	12	/	/	/	/	/
PATIENT 7	22	22	/	12	/	/	/
PATIENT 8	43	/	/	34	/	/	/
PATIENT 9	43	/	/	34	/	/	34
PATIENT 10	34	43	/	43	34	/	34
PATIENT 11	43	/	/	43	14	/	14
PATIENT 12	43	/	/	43	/	/	/
PATIENT 13	21	/	/	/	/	/	/
PATIENT 14	11	/	/	11+32	/	/	32
PATIENT 15	22	12	/	12	/	/	12
PATIENT 16	32	/	/	/	/	/	/
PATIENT 17	15	/	/	/	/	/	/
PATIENT 18	11	/	/	11	/	/	11
PATIENT 19	43	/	/	34	/	/	/
PATIENT 20	14	/	/	14	/	/	14
PATIENT 21	11	/	/	11	/	/	11
PATIENT 22	21+41	21+41	21	12+41	/	/	12+41
PATIENT 23	31	/	/	31	32	/	31
PATIENT 24	31	/	/	32	/	/	/
PATIENT 25	32	/	/	11+32	/	/	11
PATIENT 26	41	/	/	22+41	41	/	/
PATIENT 27	31	/	/	31	/	/	31
PATIENT 28	14	/	/	14	/	/	14
PATIENT 29	14	/	/	14	/	/	/
PATIENT 30	15	/	/	15	/	/	/
PATIENT 31	21	/	/	21	/	/	21
PATIENT 32	11	/	/	11	/	/	11
PATIENT 33	11	/	/	11	/	/	/
PATIENT 34	43	/	/	44	/	/	44
PATIENT 35	11	/	/	/	/	/	/
PATIENT 36	31	/	/	/	/	/	/
PATIENT 37	11	/	/	11	/	/	11
PATIENT 38	23+41	23+41	/	23+41	/	/	41
PATIENT 39	11	/	/	11	/	/	/
PATIENT 40	31	/	/	31	/	/	/
PATIENT 41	31	/	/	31	/	/	31
PATIENT 42	11	/	/	11	/	/	11
PATIENT 43	21	/	/	11	/	/	11
PATIENT 44	31	/	/	31	/	/	31
PATIENT 45	21	11+21	11+41	11+41	/	/	11+41
PATIENT 46	12	/	/	12	/	/	12
PATIENT 47	11	/	/	/	/	/	/
PATIENT 48	31	/	/	31	/	/	31
PATIENT 49	11	/	/	11	/	/	/
PATIENT 50	11	/	/	/	/	/	/
PATIENT 51	21	22	/	11+41	/	/	11+41
PATIENT 52	15	/	/	/	/	/	/
PATIENT 53	15	/	/	15	/	/	/
PATIENT 54	31	/	/	31	/	/	31
PATIENT 55	11	/	/	/	/	/	/
PATIENT 56	31	/	/	/	/	/	/
PATIENT 57	31	/	/	32	/	/	/
PATIENT 58	32	/	/	32	/	/	/
PATIENT 59	21	/	/	12	/	/	12
PATIENT 60	11+34	/	/	/	/	/	/
PATIENT 61	11	/	/	11	/	/	11
PATIENT 62	42	/	/	42	/	/	/
PATIENT 63	21	/	/	/	/	/	/
PATIENT 64	32	/	/	31	/	/	31
PATIENT 65	31	/	/	31	/	/	/
PATIENT 66	31	/	/	31	/	/	/
PATIENT 67	11	/	/	/	/	/	/
PATIENT 68	21	/	/	/	/	/	/

ANNEXE 7. Typage morphologique des lithiases urinaires des patients (suite).

PATIENT 69	11	/	/	/	/	/	/
PATIENT 70	23	/	/	23+41	/	/	/
PATIENT 71	31	/	/	31	/	/	31
PATIENT 72	42	/	/	/	/	/	/
PATIENT 73	11	/	/	/	/	/	/
PATIENT 74	31	/	/	34	/	/	34
PATIENT 75	11	/	/	11	/	/	11
PATIENT 76	11	/	/	/	/	/	/
PATIENT 77	41	/	/	41	/	/	41
PATIENT 78	21	/	/	12	/	/	/
PATIENT 79	11	/	/	/	/	/	/
PATIENT 80	11	/	/	/	/	/	/
PATIENT 84	15	/	/	/	/	/	/
PATIENT 82	11	/	/	/	/	/	/
PATIENT 83	14	/	/	14	/	/	14
PATIENT 84	21	/	/	12	/	/	12
PATIENT 85	21	/	/	12	/	/	/
PATIENT 86	41	/	/	41	/	/	41
PATIENT 87	32	11	/	32	32+11		11
PATIENT 88	22	22	/	22	/	/	22
PATIENT 89	43	/	/	43	/	/	41
PATIENT 90	11	/	/	/	/	/	/
PATIENT 91	23	23+41	/	23	/	/	/
PATIENT 92	11	32	11+31	32	31	/	31
PATIENT 93	43	/	/	44	/	/	44
PATIENT 94	14	/	/	14	/	/	14
PATIENT 95	21	12	/	12	/	/	12
PATIENT 96	42	/	/	/	/	/	/
PATIENT 97	21	/	/	/	/	/	/
PATIENT 98	21	/	/	15	/	/	15
PATIENT 99	21	/	/	12	/	/	/
PATIENT 100	11+41	11	/	11	/	/	11
PATIENT 101	15	/	/	/	/	/	/
PATIENT 102	21	/	/	12	/	/	12
PATIENT 103	15	/	/	/	/	/	/
PATIENT 104	31	/	/	/	/	/	/
PATIENT 105	21	/	/	/	/	/	/

ANNEXE 8 : Comparaison par paire des variables qualitative binaires

Variable 1	Variable 2	Chi²	p-value Chi²	Signif. Chi²	Fisher p-value	Signif. Fisher	Phi
PATIENT - sexe	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	3,36	0,0668	Non	0,04	Oui	0,1789
PATIENT - sexe	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - mamelonné	5,255	0,0219	Oui	0,0111	Oui	0,2237
PATIENT - sexe	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - ombilification	4,142	0,0418	Oui	0,0206	Oui	0,1986
PATIENT - sexe	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - plaque de randal	4,388	0,0255	Oui	0,0112	Oui	0,218
PATIENT - sexe	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	4,305	0,038	Oui	0,0248	Oui	0,2025
HISTORIQUE DE LA LITHIASE	ANOMALIE METABOLIQUE - oui/non	9,991	0,0016	Oui	0,0008	Oui	0,3085
HISTORIQUE DE LA LITHIASE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - microcristalline	4,011	0,0452	Oui	0,0283	Oui	0,1955
HISTORIQUE DE LA LITHIASE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	6,662	0,0099	Oui	0,007	Oui	0,2519
HISTORIQUE DE LA LITHIASE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	5,204	0,0225	Oui	0,0166	Oui	0,2226
ANOMALIE METABOLIQUE - oui/non	PRISE DE MEDICAMENT - oui/non	7,144	0,0075	Oui	0,0064	Oui	0,2608
ANOMALIE METABOLIQUE - oui/non	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - cristalline	3,347	0,0673	Non	0,0489	Oui	0,1785
ANOMALIE METABOLIQUE - oui/non	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	6,648	0,0099	Oui	0,0059	Oui	0,2516
INFECTION URINAIRE CONNUE - oui/non	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	13,98	0,0002	Oui	0,0007	Oui	0,3648
PRISE DE MEDICAMENT - oui/non	Var 5	5,837	0,0157	Oui	0,0056	Oui	0,2358
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - rugueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	3,718	0,0538	Non	0,0421	Oui	0,1882
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - rugueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	23,45	0	Oui	0	Oui	0,4726
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - rugueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - brillance	5,506	0,019	Oui	0,0068	Oui	0,229
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - rugueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - microcristalline	6,878	0,0087	Oui	0,0074	Oui	0,2553
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - rugueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - cristalline	9,674	0,0019	Oui	0,0018	Oui	0,3035
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - rugueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - POROSITE	9,74	0,0018	Oui	0,0017	Oui	0,3046
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - rugueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	18,06	0	Oui	0	Oui	0,4147
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - rugueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	7,107	0,0077	Oui	0,0034	Oui	0,2602
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - rugueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - jaune claire	5,002	0,0253	Oui	0,0116	Oui	0,2183
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - rugueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange	7,328	0,0068	Oui	0,0053	Oui	0,2642
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - rugueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - blanche à crème	13,06	0,0003	Oui	0,0003	Oui	0,3527
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - rugueuse	Var 2	7,245	0,0071	Oui	0,0014	Oui	0,2627
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	4,718	0,0299	Oui	0,0144	Oui	0,212
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - bosselée	12,84	0,0003	Oui	0,0013	Oui	0,3497
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - microcristalline	17,18	0	Oui	0,0001	Oui	0,4044
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - cristalline	13,17	0,0003	Oui	0,0005	Oui	0,3542
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	11,22	0,0008	Oui	0,0006	Oui	0,3269
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	3,041	0,0812	Non	0,0364	Oui	0,1702
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	5,206	0,0225	Oui	0,0165	Oui	0,2227
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - blanche à crème	5,031	0,0249	Oui	0,0243	Oui	0,2189
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	Var 6	3,764	0,0524	Non	0,0393	Oui	0,1893
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - mamelonné	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	6,97	0,0083	Oui	0,008	Oui	0,2576
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - mamelonné	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - brillance	4,374	0,0365	Oui	0,0116	Oui	0,2041
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - mamelonné	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	24,25	0	Oui	0	Oui	0,4806
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - mamelonné	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - jaune claire	4,054	0,0441	Oui	0,0206	Oui	0,1965
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - mamelonné	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - voile grisatre	19,46	0	Oui	0,0001	Oui	0,4305
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - mamelonné	Var 2	3,743	0,053	Non	0,0209	Oui	0,1888
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - bosselée	4,639	0,0312	Oui	0,0113	Oui	0,2102
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - brillance	11,23	0,0008	Oui	0,0003	Oui	0,327
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - microcristalline	8,611	0,0033	Oui	0,0011	Oui	0,2864
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - cristalline	8,126	0,0044	Oui	0,0021	Oui	0,2782
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - ombilification	9,124	0,0025	Oui	0,001	Oui	0,2948
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - plaque de randal	5,727	0,0167	Oui	0,0078	Oui	0,2335
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - POROSITE	3,208	0,0733	Non	0,0409	Oui	0,1748
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	21,22	0	Oui	0	Oui	0,4436
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	39,11	0	Oui	0	Oui	0,6103
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	4,82	0,0281	Oui	0,0204	Oui	0,2142
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - jaune claire	13,87	0,0002	Oui	0	Oui	0,3634
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - grège	6,48	0,0109	Oui	0,0055	Oui	0,2484
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - voile grisatre	8,112	0,0044	Oui	0,0022	Oui	0,2779
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	Var 2	12,93	0,0003	Oui	0	Oui	0,3509
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	Var 5	11,11	0,0009	Oui	0,0001	Oui	0,3253
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - bosselée	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - microcristalline	7,482	0,0062	Oui	0,007	Oui	0,2669
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - bosselée	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - cristalline	5,537	0,0186	Oui	0,0149	Oui	0,2296
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - bosselée	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	7,136	0,0076	Oui	0,0049	Oui	0,2607

ANNEXE 8. Comparaison par paire des variables qualitative binaires (suite)

CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - bosselée	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	6,116	0,0134	Oui	0,0118	Oui	0,2413
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - bosselée	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun cla	3,235	0,0721	Non	0,0237	Oui	0,1755
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - brillance	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	7,636	0,0057	Oui	0,0016	Oui	0,2637
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - brillance	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	3,676	0,0552	Non	0,0388	Oui	0,1871
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - brillance	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	4,729	0,0297	Oui	0,011	Oui	0,2122
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - brillance	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - jaune claire	81,16	0	Oui	0	Oui	0,8732
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - brillance	Var 2	86,79	0	Oui	0	Oui	0,3031
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - microcristalline	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - cristalline	80,37	0	Oui	0	Oui	0,8781
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - microcristalline	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - POROSITE	5,7	0,017	Oui	0,0157	Oui	0,233
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - microcristalline	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	13,63	0,0002	Oui	0,0002	Oui	0,3603
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - microcristalline	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	4,967	0,0258	Oui	0,0103	Oui	0,2175
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - microcristalline	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	11,18	0,0008	Oui	0,001	Oui	0,3264
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - cristalline	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - POROSITE	4,219	0,04	Oui	0,0284	Oui	0,2004
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - cristalline	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	12,2	0,0005	Oui	0,0004	Oui	0,3409
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - cristalline	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	3,676	0,0552	Non	0,0388	Oui	0,1871
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - cristalline	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	7,817	0,0052	Oui	0,0042	Oui	0,2729
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - ombilification	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - plaque de randal	58,59	0	Oui	0	Oui	0,747
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - ombilification	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	20,84	0	Oui	0	Oui	0,4455
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - ombilification	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun cla	7,308	0,0069	Oui	0,0044	Oui	0,2638
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - ombilification	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun-jau	8,188	0,0042	Oui	0,0031	Oui	0,2792
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - ombilification	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanc	7,308	0,0069	Oui	0,0044	Oui	0,2638
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - ombilification	Var 3	7,734	0,0054	Oui	0,0037	Oui	0,2714
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - ombilification	Var 4	4,436	0,034	Oui	0,0149	Oui	0,2069
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - plaque de randal	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	13,42	0,0002	Oui	0,0004	Oui	0,3575
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - plaque de randal	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun cla	3,393	0,0655	Non	0,037	Oui	0,1738
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - plaque de randal	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun-jau	3,871	0,0431	Oui	0,0293	Oui	0,192
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - plaque de randal	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanc	3,393	0,0655	Non	0,037	Oui	0,1738
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - plaque de randal	Var 3	3,624	0,0569	Non	0,033	Oui	0,1858
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	7,308	0,0069	Oui	0,0044	Oui	0,2638
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange	8,411	0,0037	Oui	0,009	Oui	0,283
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	6,855	0,0088	Oui	0,0053	Oui	0,2555
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	18,16	0	Oui	0	Oui	0,4159
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - jaune claire	4,46	0,0347	Oui	0,0177	Oui	0,2061
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	Var 2	6,352	0,0117	Oui	0,0055	Oui	0,246
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	Var 5	7,399	0,0047	Oui	0,0036	Oui	0,276
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	5,807	0,016	Oui	0,0058	Oui	0,2352
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - jaune claire	5,807	0,016	Oui	0,0058	Oui	0,2352
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - voile grisatre	13,6	0,0002	Oui	0,0004	Oui	0,36
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun cla	3,429	0,064	Non	0,0475	Oui	0,1807
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun-jau	4,466	0,0346	Oui	0,024	Oui	0,2062
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanc	3,429	0,064	Non	0,0475	Oui	0,1807
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	Var 2	5,382	0,0203	Oui	0,0058	Oui	0,2264
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	Var 3	3,325	0,0476	Oui	0,0433	Oui	0,1933
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	Var 1	8,839	0,0029	Oui	0,0044	Oui	0,2901
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	Var 2	4,054	0,0441	Oui	0,0206	Oui	0,1965
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - jaune claire	Var 2	32,28	0	Oui	0	Oui	0,3375
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange oncre	Var 4	4,149	0,0417	Oui	0,0177	Oui	0,1988
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange oncre	Var 6	4,594	0,0321	Oui	0,0348	Oui	0,2032
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun cla	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun-jau	31,73	0	Oui	0	Oui	0,3347
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun cla	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanc	31,75	0	Oui	0	Oui	0,3348
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun cla	Var 3	36,04	0	Oui	0	Oui	0,3564
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun cla	Var 4	33,66	0	Oui	0	Oui	0,6146
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun-jau	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanc	31,73	0	Oui	0	Oui	0,3347
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun-jau	Var 3	35,9	0	Oui	0	Oui	0,3557
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun-jau	Var 4	36,16	0	Oui	0	Oui	0,5868
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanc	Var 3	36,04	0	Oui	0	Oui	0,3564
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanc	Var 4	33,66	0	Oui	0	Oui	0,6146
Var 1	Var 5	11,2	0,0008	Oui	0,0022	Oui	0,3266
Var 3	Var 4	37,88	0	Oui	0	Oui	0,6007
Var 4	Var 5	3,332	0,0474	Oui	0,0332	Oui	0,1935
Var 4	Var 6	3,263	0,0709	Non	0,0456	Oui	0,1763
Var 5	Var 6	6,318	0,012	Oui	0,0126	Oui	0,2453

ANNEXE 9 : Comparaison par paire des variables qualitatives nominales.

Variable 1	Variable 2	Chi²	p-value Chi²	Signif. Chi²	Cramér V	Interprétation Cramér V
REGIME ALIMENTAIRE - sucrerie	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - blanche à crème	41,1122	0	Oui	0,4489	Fort
REGIME ALIMENTAIRE - viande	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	60,596	0	Oui	0,445	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - dureté	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - dureté	63,1354	0	Oui	0,5483	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - compacte	42,2767	0	Oui	0,4487	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dense	40,6944	0	Oui	0,4402	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dureté	42,3372	0	Oui	0,449	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - ruqueux	64,918	0	Oui	0,556	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - lizze	65,7359	0	Oui	0,5622	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristallisation radiale	45,7254	0	Oui	0,4666	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - concentrique	41,5706	0	Oui	0,4449	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cauchar concentriquer finer	41,8392	0	Oui	0,4464	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristalline	50,9617	0	Oui	0,4926	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - micracristalline	52,4029	0	Oui	0,4995	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun fancé	45,5758	0	Oui	0,4659	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun - naire	42,2226	0	Oui	0,4484	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - arange	42,5719	0	Oui	0,4502	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - blanche à crème	42,5719	0	Oui	0,4502	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - grège	48,2042	0	Oui	0,4791	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lizze	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - compacte	43,1476	0	Oui	0,4533	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lizze	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dense	42,7918	0	Oui	0,4514	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lizze	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dureté	48,4336	0	Oui	0,4802	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lizze	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristallisation radiale	41,1463	0	Oui	0,4426	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lizze	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - concentrique	41,4127	0	Oui	0,4441	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lizze	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cauchar concentriquer finer	48,486	0	Oui	0,4805	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lizze	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristalline	41,8515	0	Oui	0,4464	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lizze	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - micracristalline	42,1422	0	Oui	0,448	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lizze	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun fancé	43,7053	0	Oui	0,4562	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lizze	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun - naire	41,7859	0	Oui	0,4461	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lizze	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - arange	41,9859	0	Oui	0,4471	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lizze	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - blanche à crème	41,9859	0	Oui	0,4471	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lizze	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - grège	50,5829	0	Oui	0,4908	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - compacte	57,5897	0	Oui	0,5237	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dense	42,3117	0	Oui	0,4489	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dureté	64,0358	0	Oui	0,5522	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - ruqueux	40,7181	0	Oui	0,4403	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - lizze	41,6611	0	Oui	0,4475	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristallisation radiale	44,0574	0	Oui	0,458	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - concentrique	42,1307	0	Oui	0,4479	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cauchar concentriquer finer	40,7181	0	Oui	0,4403	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristalline	54,5315	0	Oui	0,5096	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - micracristalline	56,3971	0	Oui	0,5182	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun fancé	46,4016	0	Oui	0,4701	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun - naire	42,3929	0	Oui	0,4493	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - arange	42,8105	0	Oui	0,4515	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - blanche à crème	41,9238	0	Oui	0,4468	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - grège	41,9238	0	Oui	0,4468	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - compacte	57,4282	0	Oui	0,5229	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dense	41,8443	0	Oui	0,4464	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dureté	44,1352	0	Oui	0,4584	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - ruqueux	44,3317	0	Oui	0,4595	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - lizze	45,2003	0	Oui	0,4662	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristallisation radiale	46,3545	0	Oui	0,4698	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - concentrique	42,1688	0	Oui	0,4481	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cauchar concentriquer finer	41,3144	0	Oui	0,4435	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristalline	50,8647	0	Oui	0,4922	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - micracristalline	52,95	0	Oui	0,5021	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun fancé	47,3557	0	Oui	0,4749	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun - naire	41,0411	0	Oui	0,4421	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - arange	41,5579	0	Oui	0,4449	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - blanche à crème	40,5761	0	Oui	0,4396	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - grège	46,467	0	Oui	0,4704	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - dureté	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - compacte	68,9159	0	Oui	0,5729	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - dureté	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dense	48,1131	0	Oui	0,4787	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - dureté	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dureté	97,4683	0	Oui	0,5563	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - dureté	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - ruqueux	52,5514	0	Oui	0,5002	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - dureté	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - lizze	53,363	0	Oui	0,5065	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - dureté	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristallisation radiale	50,0354	0	Oui	0,4881	Fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - dureté	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - concentrique	52,2673	0	Oui	0,4989	Fort

ANNEXE 9. Comparaison par paire des variables qualitatives nominales (suite).

CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cauchar cancentriquer finer	45,9141	0	Oui	0,4676	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristalline	56,0474	0	Oui	0,5166	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - microcristalline	58,4837	0	Oui	0,5277	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun fanc6	49,6273	0	Oui	0,4861	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun - naire	58,2272	0	Oui	0,5266	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - aranqe	46,1818	0	Oui	0,4689	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - blanche à crème	48,3752	0	Oui	0,48	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - qrèqe	50,5445	0	Oui	0,4906	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - compacte	47,0884	0	Oui	0,4735	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dense	43,766	0	Oui	0,4565	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - duret6	58,3096	0	Oui	0,4302	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - ruqueux	44,4276	0	Oui	0,46	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - lizre	45,5583	0	Oui	0,468	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristallization radiale	51,3162	0	Oui	0,4943	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cancontrique	43,919	0	Oui	0,4573	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cauchar cancentriquer finer	44,5806	0	Oui	0,4607	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristalline	49,5265	0	Oui	0,4856	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - microcristalline	50,3671	0	Oui	0,4897	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun fanc6	44,2763	0	Oui	0,4592	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun - naire	56,4633	0	Oui	0,5185	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - aranqe	44,1998	0	Oui	0,4588	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - blanche à crème	42,8361	0	Oui	0,4516	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - qrèqe	44,5785	0	Oui	0,4607	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - compacte	60,0718	0	Oui	0,5348	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dense	46,0984	0	Oui	0,4685	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - duret6	54,687	0	Oui	0,5103	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - ruqueux	47,8746	0	Oui	0,4775	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - lizre	49,8408	0	Oui	0,4895	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristallization radiale	46,1616	0	Oui	0,4688	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cancontrique	54,2155	0	Oui	0,5081	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cauchar cancentriquer finer	51,9304	0	Oui	0,4973	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristalline	47,8667	0	Oui	0,4774	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - microcristalline	49,2675	0	Oui	0,4844	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun fanc6	53,4279	0	Oui	0,5044	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun - naire	54,0526	0	Oui	0,5073	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - aranqe	46,748	0	Oui	0,4718	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - blanche à crème	50,2123	0	Oui	0,489	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - qrèqe	46,748	0	Oui	0,4718	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallization radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - compacte	44,0602	0	Oui	0,4581	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallization radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dense	41,4218	0	Oui	0,4441	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallization radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - duret6	51,3871	0	Oui	0,4947	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallization radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - ruqueux	44,5536	0	Oui	0,4606	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallization radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - lizre	45,8183	0	Oui	0,4693	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallization radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristallization radiale	53,3315	0	Oui	0,5039	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallization radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cancontrique	50,7875	0	Oui	0,4918	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallization radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cauchar cancentriquer finer	49,0251	0	Oui	0,4832	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallization radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - microcristalline	56,2791	0	Oui	0,5177	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallization radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun fanc6	46,8075	0	Oui	0,4721	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallization radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun - naire	42,0752	0	Oui	0,4476	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallization radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - aranqe	44,8246	0	Oui	0,462	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallization radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - blanche à crème	43,1579	0	Oui	0,4533	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallization radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - qrèqe	53,1579	0	Oui	0,5031	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cancontrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - compacte	47,2684	0	Oui	0,4744	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cancontrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dense	40,9149	0	Oui	0,4414	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cancontrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - duret6	51,8524	0	Oui	0,4969	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cancontrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - ruqueux	41,0759	0	Oui	0,4423	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cancontrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - lizre	42,2806	0	Oui	0,4509	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cancontrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristallization radiale	45,1532	0	Oui	0,4637	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cancontrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cancontrique	74,6935	0	Oui	0,5964	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cancontrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cauchar cancentriquer finer	43,1796	0	Oui	0,4535	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cancontrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristalline	42,4872	0	Oui	0,4498	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cancontrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - microcristalline	41,8744	0	Oui	0,4465	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cancontrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun fanc6	54,1559	0	Oui	0,5078	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cancontrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun - naire	45,3726	0	Oui	0,4648	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cancontrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - aranqe	41,7352	0	Oui	0,4458	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cancontrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - blanche à crème	42,3602	0	Oui	0,4491	Fart
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cancontrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - qrèqe	42,3602	0	Oui	0,4491	Fart

ANNEXE 9. Comparaison par paire des variables qualitatives nominales (suite).

LOCALISATION DU CALCUL	REGIME ALIMENTAIRE - lait	15,7066	0,0468	Oui	0,2775 Mad6r6
LOCALISATION DU CALCUL	REGIME ALIMENTAIRE - legumessec	16,512	0,0356	Oui	0,2845 Mad6r6
LOCALISATION DU CALCUL	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun fonc6	10,4245	0,0339	Oui	0,2228 Mad6r6
LOCALISATION DU CALCUL	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	15,4111	0,0039	Oui	0,2709 Mad6r6
LOCALISATION DU CALCUL	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - duret6	17,2676	0,0083	Oui	0,2868 Mad6r6
LOCALISATION DU CALCUL	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun fonc6	9,4985	0,0498	Oui	0,2127 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - lait	REGIME ALIMENTAIRE - legumessec	30,8156	0,0142	Oui	0,2748 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - lait	REGIME ALIMENTAIRE - sucreries	42,4397	0,0024	Oui	0,3225 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - lait	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	16,4101	0,0369	Oui	0,2836 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - lait	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	27,5786	0,0064	Oui	0,3002 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - lait	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	16,0857	0,0412	Oui	0,2808 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - lait	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	22,493	0,0041	Oui	0,3321 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - lait	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cauchor concentriques fines	16,3947	0,0371	Oui	0,2835 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - lait	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun fonc6	18,9649	0,015	Oui	0,3049 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - lait	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -noire	19,2745	0,0135	Oui	0,3074 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - lait	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -jaune clair	18,4871	0,0179	Oui	0,301 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - lait	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - orange	20,0066	0,0103	Oui	0,3132 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - lait	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - grège	17,4231	0,026	Oui	0,2922 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - lait	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun fonc6	17,4496	0,0258	Oui	0,2925 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - lait	Var pm_9	15,9962	0,0424	Oui	0,28 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - legumessec	REGIME ALIMENTAIRE - viandor	40,4282	0,0044	Oui	0,3148 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - legumessec	REGIME ALIMENTAIRE - thé vert	64,7757	0	Oui	0,3985 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - legumessec	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	21,6517	0,0056	Oui	0,3258 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - legumessec	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	20,8067	0,0077	Oui	0,3194 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - legumessec	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	25,4596	0,0128	Oui	0,2884 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - legumessec	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun fonc6	19,8434	0,0109	Oui	0,3119 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - legumessec	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun fonc6	18,167	0,02	Oui	0,2984 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - sucreries	REGIME ALIMENTAIRE - viandor	52,2024	0,0011	Oui	0,3199 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - sucreries	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	23,677	0,0085	Oui	0,3407 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - sucreries	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	31,6214	0,0005	Oui	0,3937 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - sucreries	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	19,0494	0,0396	Oui	0,3056 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - sucreries	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	28,8832	0,0167	Oui	0,3072 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - sucreries	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - orange	22,9279	0,011	Oui	0,3352 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - sucreries	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	25,8944	0,0039	Oui	0,3563 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - sucreries	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cauchor concentriques fines	18,8773	0,0418	Oui	0,3042 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - sucreries	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - orange	23,8012	0,0081	Oui	0,3416 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - sucreries	Var pm_9	24,8257	0,0057	Oui	0,3488 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - viandor	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	26,8819	0,0027	Oui	0,363 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - viandor	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	29,3669	0,0011	Oui	0,3794 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - viandor	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	26,9171	0,0027	Oui	0,3632 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - viandor	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	26,2226	0,0057	Oui	0,2927 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - viandor	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	25,3138	0,0048	Oui	0,3523 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - viandor	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - grège	23,7797	0,0082	Oui	0,3414 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - thé vert	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	30,0263	0,0028	Oui	0,3837 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - thé vert	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun fonc6	28,257	0,0051	Oui	0,3722 Mad6r6
REGIME ALIMENTAIRE - thé vert	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun fonc6	31,0848	0,0019	Oui	0,3904 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - SURFACE - mamelonn6	16,6604	0,0022	Oui	0,2817 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - ASPECT	18,554	0,001	Oui	0,2972 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - COULEUR - brun jaune fonc6	16,7624	0,0021	Oui	0,2825 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	11,3612	0,0228	Oui	0,2326 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	29,719	0	Oui	0,3762 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	16,7671	0,0021	Oui	0,2826 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	23,8212	0,0006	Oui	0,3368 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	11,9708	0,0176	Oui	0,2388 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	12,5682	0,0136	Oui	0,2446 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	17,5326	0,0015	Oui	0,2889 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	13,696	0,0083	Oui	0,2554 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristalline	13,5	0,0091	Oui	0,2535 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - microcristalline	13,5	0,0091	Oui	0,2535 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - Arpect	19,9442	0,0028	Oui	0,3082 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -noire	19,3403	0,0007	Oui	0,3035 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	13,9561	0,0074	Oui	0,2578 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - duret6	31,878	0	Oui	0,3896 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - microcristalline	12,3056	0,0152	Oui	0,2421 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun -noire	12,1331	0,0164	Oui	0,2404 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - duret6	Var pm_9	17,9972	0,0012	Oui	0,2927 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - SURFACE - mamelonn6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun fonc6	14,7757	0,0052	Oui	0,2653 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - ASPECT	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	15,4853	0,0038	Oui	0,2715 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - ASPECT	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - blanche à crème	13,126	0,0107	Oui	0,25 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - COULEUR - brun jaune fonc6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - Arpect	17,7842	0,0068	Oui	0,291 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - COULEUR - brun jaune fonc6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -jaune clair	11,3998	0,0224	Oui	0,233 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - COULEUR - brun jaune fonc6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - duret6	16,4066	0,0117	Oui	0,2795 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - COULEUR - brun jaune fonc6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - concentrique	9,7486	0,0449	Oui	0,2155 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cauchor concentriques fines	Var pm_9	12,6989	0,0128	Oui	0,2459 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - Arpect	Var pm_9	23,2865	0,0007	Oui	0,333 Mad6r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	Var pm_9	14,837	0,0051	Oui	0,2658 Mad6r6

ANNEXE 9. Comparaison par paire des variables qualitatives nominales (suite).

CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dense	Var pm_9	9,8947	0,0422	Oui	0,2171 Mod&r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - blanche à crème	Var pm_9	16,4771	0,0024	Oui	0,2301 Mod&r6
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - SURFACE - mamelonn&	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - ASPECT	109,4811	0	Oui	0,722 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - SURFACE - mamelonn&	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - COULEUR - brun jaune fonc&	123,2292	0	Oui	0,766 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - SURFACE - mamelonn&	Var pm_9	106,8667	0	Oui	0,7134 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - ASPECT	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - COULEUR - brun jaune fonc&	105,4242	0	Oui	0,7085 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - ASPECT	Var pm_9	116,6932	0	Oui	0,7454 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - COULEUR - brun jaune fonc&	Var pm_9	123,2292	0	Oui	0,766 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	140,5626	0	Oui	0,8181 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	131,1716	0	Oui	0,7903 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	128,4412	0	Oui	0,7821 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - dure&6	127,7721	0	Oui	0,78 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	149,0684	0	Oui	0,8425 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	105,8696	0	Oui	0,71 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisatian radiale	111,708	0	Oui	0,7293 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	105,0684	0	Oui	0,7073 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - caucher concentriquer finer	105,8681	0	Oui	0,71 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	120,2878	0	Oui	0,7568 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristalline	123,1782	0	Oui	0,7659 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - microcristalline	123,1782	0	Oui	0,7659 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - Aspect	120,2013	0	Oui	0,7566 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun fonc&	112,151	0	Oui	0,7308 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -noire	107,8919	0	Oui	0,7168 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -jaune clair	102,918	0	Oui	0,7001 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - orange	105,2738	0	Oui	0,708 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	101,0229	0	Oui	0,6936 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - ruqueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - grège	113,3524	0	Oui	0,7347 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	106,8914	0	Oui	0,7134 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	105,3294	0	Oui	0,7082 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - dure&6	117,3134	0	Oui	0,7474 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	107,422	0	Oui	0,7152 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	110,1398	0	Oui	0,7242 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisatian radiale	105,3134	0	Oui	0,7082 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	107,5075	0	Oui	0,7155 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - caucher concentriquer finer	106,1669	0	Oui	0,711 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	107,0621	0	Oui	0,714 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristalline	105,0963	0	Oui	0,7074 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - microcristalline	105,0963	0	Oui	0,7074 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - Aspect	112,011	0	Oui	0,7303 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun fonc&	107,422	0	Oui	0,7152 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -noire	105,9795	0	Oui	0,7104 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -jaune clair	101,2728	0	Oui	0,6944 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - orange	105,9795	0	Oui	0,7104 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	102,6295	0	Oui	0,6991 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - grège	104,9113	0	Oui	0,7068 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - ruqueux	84,9709	0	Oui	0,6361 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - lisse	85,4511	0	Oui	0,641 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	124,9542	0	Oui	0,7714 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - dure&6	159,1966	0	Oui	0,8707 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	151,768	0	Oui	0,8501 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	112,1182	0	Oui	0,7207 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisatian radiale	130,2448	0	Oui	0,7878 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	112,8233	0	Oui	0,733 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - caucher concentriquer finer	107,0585	0	Oui	0,714 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	125,2595	0	Oui	0,7723 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristalline	142,7912	0	Oui	0,8246 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - microcristalline	142,7912	0	Oui	0,8246 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - Aspect	109,4319	0	Oui	0,7219 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun fonc&	112,8339	0	Oui	0,733 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -noire	108,1681	0	Oui	0,7177 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -jaune clair	100,622	0	Oui	0,6922 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - orange	105,4041	0	Oui	0,7085 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	109,0892	0	Oui	0,7207 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - grège	105,8573	0	Oui	0,71 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - dure&6	137,4139	0	Oui	0,8089 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	135,0248	0	Oui	0,8019 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	114,3771	0	Oui	0,738 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisatian radiale	118,7455	0	Oui	0,752 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	113,0659	0	Oui	0,7338 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - caucher concentriquer finer	105,7551	0	Oui	0,7096 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	121,9809	0	Oui	0,7621 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristalline	122,0408	0	Oui	0,7623 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - microcristalline	122,0408	0	Oui	0,7623 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - Aspect	112,5851	0	Oui	0,7322 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun fonc&	114,3111	0	Oui	0,7378 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -noire	107,0165	0	Oui	0,7139 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -jaune clair	109,3197	0	Oui	0,7215 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - orange	105,1909	0	Oui	0,7077 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	102,0603	0	Oui	0,6971 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - grège	103,0442	0	Oui	0,7173 Très fort

ANNEXE 9. Comparaison par paire des variables qualitatives nominales (suite).

CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	156,5954	0	Oui	0,7051 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	130,8939	0	Oui	0,7895 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	134,5638	0	Oui	0,8005 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	129,3704	0	Oui	0,7849 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cauchor concentriquer finer	105,6125	0	Oui	0,7092 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	131,2879	0	Oui	0,7907 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristalline	138,402	0	Oui	0,8118 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - microcristalline	138,402	0	Oui	0,8118 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - Aspect	128,0408	0	Oui	0,6376 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun fancé	121,615	0	Oui	0,761 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -noire	126,875	0	Oui	0,7773 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -jaune clair	107,7542	0	Oui	0,7163 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - orange	114,3336	0	Oui	0,7379 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	112,4299	0	Oui	0,7317 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - duret6	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - grège	106,5036	0	Oui	0,7122 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	126,8879	0	Oui	0,7773 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	130,4545	0	Oui	0,7882 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	116,2159	0	Oui	0,7439 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cauchor concentriquer finer	110,9151	0	Oui	0,7268 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	182,0268	0	Oui	0,931 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristalline	125,3046	0	Oui	0,7725 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - microcristalline	125,3046	0	Oui	0,7725 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - Aspect	117,2182	0	Oui	0,61 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun fancé	110,9151	0	Oui	0,7268 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -noire	117,6477	0	Oui	0,7485 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -jaune clair	102,7135	0	Oui	0,6994 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - orange	106,9091	0	Oui	0,7135 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	103,9488	0	Oui	0,7036 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - grège	114,7203	0	Oui	0,7391 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	111,8204	0	Oui	0,7297 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	131,3132	0	Oui	0,7908 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cauchor concentriquer finer	113,0511	0	Oui	0,7337 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	123,6353	0	Oui	0,7673 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristalline	111,1521	0	Oui	0,7275 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - microcristalline	111,1521	0	Oui	0,7275 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - Aspect	120,9018	0	Oui	0,7588 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun fancé	136,0304	0	Oui	0,8048 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -noire	113,8517	0	Oui	0,7363 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -jaune clair	101,0734	0	Oui	0,6938 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - orange	113,8517	0	Oui	0,7363 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	100,9299	0	Oui	0,6933 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - grège	101,1305	0	Oui	0,694 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	128,3333	0	Oui	0,7817 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cauchor concentriquer finer	123,9786	0	Oui	0,7684 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	132,6316	0	Oui	0,7947 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristalline	137,2596	0	Oui	0,8085 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - microcristalline	137,2596	0	Oui	0,8085 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - Aspect	105,7368	0	Oui	0,7096 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun fancé	118,5882	0	Oui	0,7515 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -noire	105	0	Oui	0,7071 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -jaune clair	100,6606	0	Oui	0,6923 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - orange	103,2812	0	Oui	0,7181 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	106,9698	0	Oui	0,7137 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - grège	111,809	0	Oui	0,7297 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cauchor concentriquer finer	121,2273	0	Oui	0,7598 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	118,8158	0	Oui	0,7522 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristalline	112,5511	0	Oui	0,7321 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - microcristalline	112,5511	0	Oui	0,7321 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - Aspect	125,2977	0	Oui	0,7724 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun fancé	140,0936	0	Oui	0,8168 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -noire	111,5625	0	Oui	0,7289 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -jaune clair	106,0757	0	Oui	0,7107 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - orange	107,5635	0	Oui	0,7157 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	105,7574	0	Oui	0,7097 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - grège	104,8557	0	Oui	0,7066 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cauchor concentriquer finer	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	113,5407	0	Oui	0,7353 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cauchor concentriquer finer	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristalline	113,3173	0	Oui	0,7346 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cauchor concentriquer finer	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - microcristalline	113,3173	0	Oui	0,7346 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cauchor concentriquer finer	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - Aspect	109,6504	0	Oui	0,7226 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cauchor concentriquer finer	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun fancé	110,6557	0	Oui	0,7259 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cauchor concentriquer finer	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -noire	109,0568	0	Oui	0,7206 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cauchor concentriquer finer	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -jaune clair	102,749	0	Oui	0,6995 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cauchor concentriquer finer	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - orange	109,0568	0	Oui	0,7206 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cauchor concentriquer finer	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	120,507	0	Oui	0,7575 Très fort
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cauchor concentriquer finer	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - grège	112,7509	0	Oui	0,7327 Très fort

ANNEXE 10 : Comparaison par paire des variables quantitatives.

Variable 2	Corrélation	p-value Corrélation	Coefficient Régression	p-value Régression	Nombre de points
BILAN BIOLOGIQUE - gly UR (g/24h)	0,863707012	4,12791E-20	0,28977887	4,12791E-20	64
BILAN BIOLOGIQUE - Mg UR (mg/24h)	0,625854137	4,13746E-09	3,108303396	4,13746E-09	72
BILAN BIOLOGIQUE - PH	0,603947587	9,67464E-09	0,001007383	9,67464E-09	75
BILAN BIOLOGIQUE - PTH (pg/ml)	0,577094109	2,1291E-09	0,482174301	2,1291E-09	91
BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	0,540389121	2,25832E-08	3,07828398	2,25832E-08	93
BILAN BIOLOGIQUE - PROT 24H (g/24h)	0,469154994	0,000345517	4,10401E-05	0,000345517	54
BILAN BIOLOGIQUE - Na+ UR (mEq/l)	0,468351285	0,000272369	6,524180291	0,000272369	56
BILAN BIOLOGIQUE - gly UR (g/24h)	0,465361809	0,001663802	0,013887201	0,001663802	43
BILAN BIOLOGIQUE - PH	0,460363157	9,29033E-06	0,938883725	9,29033E-06	85
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,448161444	1,19456E-05	1,695455011	1,19456E-05	88
BILAN BIOLOGIQUE - Mg UR (mg/24h)	0,431752847	0,001558767	1,540580184	0,001558767	51
BILAN BIOLOGIQUE - Na+ UR (mEq/l)	0,429503309	0,000120404	2,178340206	0,000120404	75
BILAN BIOLOGIQUE - PTH (pg/ml)	0,395350188	0,000216372	0,017421599	0,000216372	83
PATIENT - IMC	0,376027576	0,00113308	0,194467743	0,00113308	72
BILAN BIOLOGIQUE - ac urique Sg (mg/l)	0,371030047	0,000198065	0,457135617	0,000198065	96
BILAN BIOLOGIQUE - Na+ sg (mEq/l)	0,367658551	0,005754659	14,41093261	0,005754659	55
BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	0,36337256	0,000465199	0,000310669	0,000465199	89
BILAN BIOLOGIQUE - gly Sg (g/l)	0,355511788	0,002928712	0,030545621	0,002928712	68
BILAN BIOLOGIQUE - Na+ UR (mEq/l)	0,354688888	0,009162594	4,45984823	0,009162594	53
BILAN BIOLOGIQUE - Mg UR (mg/24h)	0,354411546	0,010720584	38,80615601	0,010720584	51
BILAN BIOLOGIQUE - urée Sg (g/l)	0,353150762	0,000416718	0,003642077	0,000416718	96
BILAN BIOLOGIQUE - urée Sg (g/l)	0,34438248	0,005713156	0,190018688	0,005713156	63
BILAN BIOLOGIQUE - gly UR (g/24h)	0,337887444	0,006321225	0,005877005	0,006321225	64
BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	0,314655685	0,002384027	0,006072952	0,002384027	91
BILAN BIOLOGIQUE - Na+ UR (mEq/l)	0,313906987	0,018474174	0,211201452	0,018474174	56
BILAN BIOLOGIQUE - PROT 24H (g/24h)	0,306898308	0,008737752	0,005916873	0,008737752	72
BILAN BIOLOGIQUE - urée UR (mmol/24	0,30359985	0,01395036	3,507876487	0,01395036	65
BILAN BIOLOGIQUE - Na+ sg (mEq/l)	0,299014866	0,025179139	0,107472584	0,025179139	56
BILAN BIOLOGIQUE - Na+ sg (mEq/l)	0,298124297	0,02429629	0,135008914	0,02429629	57
BILAN BIOLOGIQUE - urée Sg (g/l)	0,284694461	0,004934035	0,068494989	0,004934035	96
BILAN BIOLOGIQUE - densité	0,2837869	0,035758867	0,000210803	0,035758867	55
BILAN BIOLOGIQUE - densité	0,277952868	0,033046829	1,89993E-05	0,033046829	59
BILAN BIOLOGIQUE - Mg UR (mg/24h)	0,266309105	0,022764232	10,04492235	0,022764232	73
BILAN BIOLOGIQUE - ac urique UR (mg/2	0,264227563	0,033428842	0,579221184	0,033428842	65
BILAN BIOLOGIQUE - Mg UR (mg/24h)	0,250643235	0,031246698	0,473435995	0,031246698	74
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,249925152	0,016884005	4,74042735	0,016884005	91
BILAN BIOLOGIQUE - Na+ UR (mEq/l)	0,249448424	0,029774451	1,575994051	0,029774451	76
BILAN BIOLOGIQUE - gly Sg (g/l)	0,245342835	0,014378692	0,010391259	0,014378692	99
BILAN BIOLOGIQUE - ac urique Sg (mg/l)	0,241444447	0,03960457	0,156138285	0,03960457	73
BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,232555042	0,024098428	4,315869003	0,024098428	94
BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	0,230967562	0,027615423	0,000684534	0,027615423	91
BILAN BIOLOGIQUE - Mg Sg (mg/l)	0,230141348	0,041309178	0,37562697	0,041309178	79
BILAN BIOLOGIQUE - PH	0,228041714	0,043249851	0,008468365	0,043249851	79
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	0,219238751	0,049243718	0,444608615	0,049243718	81
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	-0,218713129	0,030492214	-0,071192199	0,030492214	98
BILAN BIOLOGIQUE - PTH (pg/ml)	-0,219113883	0,036910867	-9,710136583	0,036910867	91
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	-0,235322094	0,028228043	-933,9021922	0,028228043	87
BILAN BIOLOGIQUE - PH	-0,238615082	0,027862156	-0,408385621	0,027862156	85
BILAN BIOLOGIQUE - PH	-0,263212533	0,017590806	-0,014961709	0,017590806	81
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	-0,26735645	0,010407736	-11,21854983	0,010407736	91
BILAN BIOLOGIQUE - PH	-0,268861024	0,016579874	-0,000880723	0,016579874	79
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	-0,277450725	0,030400952	-1,262040173	0,030400952	61
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	-0,29987395	0,018876882	-787,3560712	0,018876882	61
BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	-0,318691067	0,009671461	-0,001142568	0,009671461	65
BILAN BIOLOGIQUE - PH	-0,333868215	0,002038407	-0,034438262	0,002038407	83
BILAN BIOLOGIQUE - PH	-0,342870313	0,00420612	-0,003958618	0,00420612	68
BILAN BIOLOGIQUE - ac urique Sg (mg/l)	-0,347328768	0,00098051	-0,009659096	0,00098051	87
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	-0,353641042	0,005176392	-26,58228312	0,005176392	61
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	-0,380847998	0,000212966	-0,023307482	0,000212966	90
BILAN BIOLOGIQUE - PROT 24H (g/24h)	-0,39714386	0,003235255	-0,000841934	0,003235255	53
BILAN BIOLOGIQUE - PH	-0,401174416	0,000141794	-0,026988619	0,000141794	85
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	-0,401399908	9,67694E-05	-373,6356923	9,67694E-05	89
BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	-0,413858011	5,02023E-05	-25,01863681	5,02023E-05	90
BILAN BIOLOGIQUE - Na+ sg (mEq/l)	-0,418352319	0,00164354	-0,004402205	0,00164354	54
BILAN BIOLOGIQUE - Na+ UR (mEq/l)	-0,472064641	2,83536E-05	-0,068089562	2,83536E-05	72
BILAN BIOLOGIQUE - PH	-0,491300512	7,77648E-05	-0,003632452	7,77648E-05	59
BILAN BIOLOGIQUE - PH	-0,555145361	5,03679E-06	-0,083808398	5,03679E-06	59

ANNEXE 11 : Etude des variables quantitatives en fonction des variables qualitatives binaires.

Variable binaire	Variable quantitative	Levene Stat	Levene p-value	vene interprétati	Test utilisé	t-Stat	t p-value
HISTORIQUE DE LA LITHIASE	BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	0,46855235	0,49533358	non significative	Student (var égales)	-1,936806767	0,048834002
HISTORIQUE DE LA LITHIASE	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,08063618	0,777096701	non significative	Student (var égales)	-3,68153331	0,000397073
ANOMALIE METABOLIQUE - oui/non	BILAN BIOLOGIQUE - gly Sg (g/l)	41,824864	4,04641E-09	significative	Student corrigé (Welch)	-3,339059826	0,001257565
ANOMALIE METABOLIQUE - oui/non	BILAN BIOLOGIQUE - gly UR (g/24h)	6,4746441	0,013446823	significative	Student corrigé (Welch)	-2,748862853	0,008658319
ANOMALIE METABOLIQUE - oui/non	BILAN BIOLOGIQUE - Ca Sg (mg/l)	3,35521213	0,049486437	significative	Student corrigé (Welch)	-2,37432292	0,020362506
ANOMALIE METABOLIQUE - oui/non	BILAN BIOLOGIQUE - PTH (pg/ml)	5,7530603	0,018547384	significative	Student corrigé (Welch)	-2,136086136	0,031931938
ANOMALIE METABOLIQUE - oui/non	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ UR (mEq/l)	14,6744034	0,00026565	significative	Student corrigé (Welch)	2,807091389	0,007422188
INFECTION URINAIRE CONNUE - oui/non	BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	4,71249324	0,032546819	significative	Student corrigé (Welch)	-2,62398372	0,01573935
INFECTION URINAIRE CONNUE - oui/non	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,85560648	0,357472398	non significative	Student (var égales)	-2,118156141	0,036949443
INFECTION URINAIRE CONNUE - oui/non	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ UR (mEq/l)	4,38603776	0,028576784	significative	Student corrigé (Welch)	-2,305236295	0,025862602
INFECTION URINAIRE CONNUE - oui/non	BILAN BIOLOGIQUE - PH	5,58020353	0,020505094	significative	Student corrigé (Welch)	-2,290938653	0,042497654
PRISE DE MEDICAMENT - oui/non	PATIENT - age	0,38016479	0,53887547	non significative	Student (var égales)	-2,082836085	0,039742837
PRISE DE MEDICAMENT - oui/non	BILAN BIOLOGIQUE - gly Sg (g/l)	45,6531588	1,05135E-09	significative	Student corrigé (Welch)	-3,478379173	0,001174838
PRISE DE MEDICAMENT - oui/non	BILAN BIOLOGIQUE - gly UR (g/24h)	9,45982898	0,003122973	significative	Student corrigé (Welch)	-3,328155799	0,002172656
PRISE DE MEDICAMENT - oui/non	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,27613979	0,60050683	non significative	Student (var égales)	-2,100755587	0,038397608
PRISE DE MEDICAMENT - oui/non	BILAN BIOLOGIQUE - Mg UR (mg/24h)	4,61363903	0,034368381	significative	Student corrigé (Welch)	-2,06176229	0,046360526
PRISE DE MEDICAMENT - oui/non	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	3,00065515	0,086635132	non significative	Student (var égales)	3,093231075	0,002644619
PRISE DE MEDICAMENT - oui/non	BILAN BIOLOGIQUE - ac urique Sg (mg/l)	0,20360759	0,648131635	non significative	Student (var égales)	-3,033097194	0,003129011
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - rugueuse	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,46185828	0,498520571	non significative	Student (var égales)	-2,322609606	0,022481222
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - rugueuse	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ UR (mEq/l)	3,59722713	0,00275381	significative	Student corrigé (Welch)	2,160060572	0,039862861
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - bourgeonnante	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	5,61225825	0,019397907	significative	Student corrigé (Welch)	-4,666420308	1,41626E-05
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - bourgeonnante	BILAN BIOLOGIQUE - ac urique Sg (mg/l)	1,23826154	0,257426244	non significative	Student (var égales)	2,338586761	0,021476073
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - bourgeonnante	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ sg (mEq/l)	0,03472917	0,852849388	non significative	Student (var égales)	2,073214446	0,042849764
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - bourgeonnante	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ UR (mEq/l)	1,66455244	0,201006886	non significative	Student (var égales)	3,362588132	0,000169209
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	PATIENT - age	2,51123869	0,116102656	non significative	Student (var égales)	2,931014829	0,00416224
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	PATIENT - IMC	1,55386357	0,216721269	non significative	Student (var égales)	4,165562629	8,73022E-05
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,77486775	0,381086179	non significative	Student (var égales)	-4,561585975	1,61578E-05
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	BILAN BIOLOGIQUE - densité	3,83403539	0,052142322	non significative	Student (var égales)	2,14444272	0,035236376
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	0,60315453	0,439266688	non significative	Student (var égales)	-3,886347607	0,000186157
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - crayeuse	BILAN BIOLOGIQUE - PH	2,26421186	0,136189595	non significative	Student (var égales)	-7,454893217	7,83299E-11
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - mamelonné	BILAN BIOLOGIQUE - Ca Sg (mg/l)	0,9336195	0,334686768	non significative	Student (var égales)	2,543559824	0,012520193
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - mamelonné	BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	0,07085589	0,790696851	non significative	Student (var égales)	4,054148144	0,000105944
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	PATIENT - age	0,21788825	0,641639557	non significative	Student (var égales)	-1,995021382	0,048681918
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	PATIENT - IMC	2,76998672	0,100517498	non significative	Student (var égales)	-2,200510053	0,031072177
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	BILAN BIOLOGIQUE - Ca Sg (mg/l)	3,98455147	0,048665899	significative	Student corrigé (Welch)	2,452309971	0,015945587
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	0,30210057	0,583914349	non significative	Student (var égales)	7,773463262	1,09327E-11
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	1,70589516	0,1946397	non significative	Student (var égales)	-3,13483853	0,002281671
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,33325693	0,565205047	non significative	Student (var égales)	3,94333974	0,000156495
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	BILAN BIOLOGIQUE - PH	1,15613681	0,285371505	non significative	Student (var égales)	2,120692783	0,036932185
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - bosselée	PATIENT - IMC	0,04011731	0,841832165	non significative	Student (var égales)	2,105820813	0,038808303
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - bosselée	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	0,1930359	0,656504812	non significative	Student (var égales)	2,302010767	0,023495532
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - bosselée	BILAN BIOLOGIQUE - ac urique Sg (mg/l)	1,12260582	0,292073014	non significative	Student (var égales)	-3,070183517	0,002736694
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - brillance	BILAN BIOLOGIQUE - gly Sg (g/l)	11,0843725	0,001231434	significative	Student corrigé (Welch)	2,076140731	0,041120837
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - brillance	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,17271536	0,678677509	non significative	Student (var égales)	2,249556009	0,026862198
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - brillance	BILAN BIOLOGIQUE - Ca Sg (mg/l)	4,041182	0,047122968	significative	Student corrigé (Welch)	-2,762878976	0,010607138
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - brillance	BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	2,3128724	0,131773961	non significative	Student (var égales)	-5,308358713	5,31833E-08
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - brillance	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	0,07981339	0,778158667	non significative	Student (var égales)	2,345973461	0,021034345
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - microcristalline	PATIENT - IMC	0,6432104	0,423123819	non significative	Student (var égales)	2,826305204	0,006122616
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - microcristalline	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,26762786	0,606210872	non significative	Student (var égales)	-2,369788807	0,019358932
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - microcristalline	BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	0,83341075	0,361837539	non significative	Student (var égales)	-2,171178109	0,03235708
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - cristalline	PATIENT - IMC	1,26639065	0,264176487	non significative	Student (var égales)	-2,70472957	0,008576816
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - cristalline	BILAN BIOLOGIQUE - densité	2,56157435	0,113693704	non significative	Student (var égales)	-2,102466806	0,038868537
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - cristalline	BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	1,76930209	0,18658752	non significative	Student (var égales)	3,294138587	0,001378943
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - cristalline	BILAN BIOLOGIQUE - PH	3,43746445	0,067285543	non significative	Student (var égales)	2,27623244	0,025407234
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - ombilification	BILAN BIOLOGIQUE - urée UR (mmol/24h)	2,51857523	0,117519039	non significative	Student (var égales)	2,065157847	0,043028614
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - ombilification	BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	2,97136367	0,088146278	non significative	Student (var égales)	3,310424264	0,001336455
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - ombilification	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	5,42108142	0,022161543	significative	Student corrigé (Welch)	5,097539737	0,001858114
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - plaque de randal	BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	2,20413342	0,141037036	non significative	Student (var égales)	2,889923534	0,004816984
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - plaque de randal	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	5,42108142	0,022161543	significative	Student corrigé (Welch)	5,097539737	0,001858114
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - plaque de randal	BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	4,50588908	0,036324444	significative	Student corrigé (Welch)	2,372314725	0,013655659
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ UR (mEq/l)	7,06606827	0,00962154	significative	Student corrigé (Welch)	2,235826123	0,031733375
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun	BILAN BIOLOGIQUE - Mg UR (mg/24h)	5,43369933	0,021848801	significative	Student corrigé (Welch)	2,379633263	0,004262425
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun	BILAN BIOLOGIQUE - PH	3,92280884	0,050347528	non significative	Student (var égales)	-2,235466134	0,028071921

ANNEXE 11. Etude des variables quantitatives en fonction des variables qualitatives binaires (suite).

CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	BILAN BIOLOGIQUE - urée UR (mmol/24h)	0,07340962	0,787321314	non significative	Student (var égales)	2,366441169	0,021047254
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	BILAN BIOLOGIQUE - Ca Sg (mg/l)	1,08544647	0,300019302	non significative	Student (var égales)	3,523912007	0,000645367
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	4,88343806	0,029623347	significative	Student corrigé (Welch)	12,3465279	1,1605E-20
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	1,67587166	0,198573106	non significative	Student (var égales)	-3,118475756	0,002399726
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	2,28188113	0,134435459	non significative	Student (var égales)	3,653341762	0,000428139
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun foncé	BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	0,21001189	0,647783129	non significative	Student (var égales)	2,002830163	0,047986328
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	PATIENT - age	1,5232705	0,219034312	non significative	Student (var égales)	2,610702071	0,010383159
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	PATIENT - IMC	0,52848289	0,469663645	non significative	Student (var égales)	2,331557377	0,019467706
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	BILAN BIOLOGIQUE - gly Sg (g/l)	7,93522786	0,005874582	significative	Student corrigé (Welch)	2,930723618	0,004806807
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	1,9032046	0,170258733	non significative	Student (var égales)	2,634749387	0,00981714
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	5,89375672	0,017153358	significative	Student corrigé (Welch)	-5,108812925	1,31072E-05
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	BILAN BIOLOGIQUE - PTH (pg/ml)	0,38184431	0,538211505	non significative	Student (var égales)	-2,313773635	0,022641037
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ sg (mEq/l)	0,05132568	0,821612246	non significative	Student (var égales)	3,68731769	0,000520181
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ UR (mEq/l)	20,6387884	2,06243E-05	significative	Student corrigé (Welch)	3,2351939	0,003837072
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	0,18297362	0,669773197	non significative	Student (var égales)	-2,191815131	0,030785789
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	BILAN BIOLOGIQUE - PH	1,0843684	0,300746153	non significative	Student (var égales)	-3,39421281	0,000139712
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - jaune claire	BILAN BIOLOGIQUE - gly Sg (g/l)	9,43385494	0,002764224	significative	Student corrigé (Welch)	2,096109297	0,039635035
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - jaune claire	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,36080246	0,549537846	non significative	Student (var égales)	1,387351277	0,049857275
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - jaune claire	BILAN BIOLOGIQUE - Ca Sg (mg/l)	1,88427292	0,172950351	non significative	Student (var égales)	-3,043977228	0,002936595
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - jaune claire	BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	2,98878319	0,087234476	non significative	Student (var égales)	-5,935823333	5,24636E-08
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - beige à orange	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	4,03453959	0,047607149	significative	Student corrigé (Welch)	4,326071749	0,037101502
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange	PATIENT - IMC	0,25622248	0,614317853	non significative	Student (var égales)	-2,824368589	0,00615587
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange	BILAN BIOLOGIQUE - urée UR (mmol/24h)	0,0473923	0,8283682	non significative	Student (var égales)	-2,070079476	0,042550098
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange	BILAN BIOLOGIQUE - Mg UR (mg/24h)	1,53103167	0,219377335	non significative	Student (var égales)	-3,412467164	0,001059773
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	9,26953492	0,003064061	significative	Student corrigé (Welch)	4,356558237	0,000438267
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ UR (mEq/l)	0,36821213	0,323413264	non significative	Student (var égales)	-2,23394167	0,028508051
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange	BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	0,76653294	0,383454612	non significative	Student (var égales)	1,991082661	0,049284693
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange	BILAN BIOLOGIQUE - PH	1,49865297	0,224342276	non significative	Student (var égales)	3,026790935	0,003291348
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange oncre	PATIENT - IMC	1,27106287	0,263417112	non significative	Student (var égales)	-2,437680199	0,01485419
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange oncre	BILAN BIOLOGIQUE - gly Sg (g/l)	0,29799265	0,58633687	non significative	Student (var égales)	-3,67384918	0,000391404
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange oncre	BILAN BIOLOGIQUE - gly UR (g/24h)	0,03373275	0,854875796	non significative	Student (var égales)	-4,001642882	0,000170433
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange oncre	BILAN BIOLOGIQUE - urée Sg (g/l)	0,03233293	0,85768596	non significative	Student (var égales)	-2,682288614	0,008638524
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange oncre	BILAN BIOLOGIQUE - urée UR (mmol/24h)	0,72852309	0,396596042	non significative	Student (var égales)	-2,105078197	0,039278315
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange oncre	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,05093064	0,821952311	non significative	Student (var égales)	-2,355816131	0,020605552
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange oncre	BILAN BIOLOGIQUE - Mg UR (mg/24h)	1,32105445	0,254206638	non significative	Student (var égales)	-2,164426958	0,033748557
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange oncre	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	4,51075683	0,036456542	significative	Student corrigé (Welch)	4,446236951	0,004027635
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange oncre	BILAN BIOLOGIQUE - ac urique Sg (mg/l)	0,01094693	0,916834244	non significative	Student (var égales)	-2,174643845	0,032166778
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange oncre	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ sg (mEq/l)	0,59559715	0,443566218	non significative	Student (var égales)	-2,181998133	0,033339601
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - orange oncre	BILAN BIOLOGIQUE - PH	5,46025957	0,021864048	significative	Student corrigé (Welch)	3,83003554	0,000248081
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - beige à grisatre	PATIENT - age	0,08805497	0,767262131	non significative	Student (var égales)	-2,087652225	0,039236434
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - beige à grisatre	BILAN BIOLOGIQUE - urée Sg (g/l)	0,0002237	0,988038567	non significative	Student (var égales)	-1,993250862	0,049132896
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - beige à grisatre	BILAN BIOLOGIQUE - urée UR (mmol/24h)	0,25454735	0,615651346	non significative	Student (var égales)	-2,190049616	0,032230529
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - beige à grisatre	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	1,1146601	0,293835804	non significative	Student (var égales)	-2,053667269	0,04284603
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - blanche à crème	PATIENT - age	0,03247308	0,857334317	non significative	Student (var égales)	2,226356834	0,028168215
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - blanche à crème	PATIENT - IMC	4,6223766	0,035014355	significative	Student corrigé (Welch)	4,173038785	0,000844506
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - blanche à crème	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,57662605	0,443644458	non significative	Student (var égales)	-4,006888965	0,000127456
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - blanche à crème	BILAN BIOLOGIQUE - ac urique Sg (mg/l)	0,50739805	0,478031734	non significative	Student (var égales)	2,016613751	0,046588897
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - blanche à crème	BILAN BIOLOGIQUE - PTH (pg/ml)	0,08139668	0,775275092	non significative	Student (var égales)	-2,03305623	0,044410716
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - blanche à crème	BILAN BIOLOGIQUE - PH	1,64405618	0,203339603	non significative	Student (var égales)	-2,250010888	0,027034305
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - blanc	BILAN BIOLOGIQUE - Ca Sg (mg/l)	0,1133643	0,73705865	non significative	Student (var égales)	-2,538122826	0,012704027
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - blanc	BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	1,75441037	0,188640108	non significative	Student (var égales)	-2,025457976	0,045749654
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - blanc	BILAN BIOLOGIQUE - PTH (pg/ml)	2,4907825	0,118062654	non significative	Student (var égales)	-2,747138785	0,007276105
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - crème	BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	4,49655342	0,036683556	significative	Student corrigé (Welch)	-2,449432575	0,040235479
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - crème	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	5,85362366	0,017370563	significative	Student corrigé (Welch)	3,3717177	0,002667832
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - crème	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	10,7090121	0,001518492	significative	Student corrigé (Welch)	-6,409062342	1,93385E-07
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - crème	BILAN BIOLOGIQUE - PH	0,07574729	0,783823478	non significative	Student (var égales)	-3,72104602	0,000359313
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - grège	BILAN BIOLOGIQUE - ac urique Sg (mg/l)	0,83624857	0,346216334	non significative	Student (var égales)	-2,471332721	0,015261343
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - grège	BILAN BIOLOGIQUE - PH	0,29468846	0,588686411	non significative	Student (var égales)	3,021975763	0,003338809
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - voile grisatre	BILAN BIOLOGIQUE - Ca Sg (mg/l)	0,35636114	0,551836941	non significative	Student (var égales)	2,105929138	0,037740146
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - voile grisatre	BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	3,83512631	0,053251743	non significative	Student (var égales)	4,130901457	8,01198E-05
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - voile grisatre	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	1,46306041	0,229414071	non significative	Student (var égales)	-2,436255669	0,016683316
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - voile grisatre	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	1,4736812	0,227977323	non significative	Student (var égales)	2,229331067	0,028304999
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun claire	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,02397943	0,877287763	non significative	Student (var égales)	2,08908732	0,03955476
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun-jaune foncé	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,00603975	0,938228553	non significative	Student (var égales)	2,122753404	0,036551321

ANNEXE 12 : Étude des variables quantitatives en fonction des variables qualitatives nominales.

Variable qualitative	Variable quantitative	Levene Stat	Levene p-value	Levene interprétation	Test utilisé	Statistique	p-value
LOCALISATION DU CALCUL	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	1,034382176	0,359726612	non significative	ANOVA	4,83326721	0,010195848
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - dureté	PATIENT - age	0,030110705	0,970346728	non significative	ANOVA	3,00838636	0,000243614
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - dureté	PATIENT - IMC	1,634395088	0,20241504	non significative	ANOVA	5,13188045	0,008360213
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - dureté	BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	1,504329198	0,227638845	non significative	ANOVA	42,3815185	1,0732E-13
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - dureté	BILAN BIOLOGIQUE - Mg Sg (mg/l)	0,648280701	0,525663058	non significative	ANOVA	3,23100969	0,044728517
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - dureté	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	0,302951685	0,408821525	non significative	ANOVA	5,58525821	0,005089611
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - dureté	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	1,3224615	0,271721662	non significative	ANOVA	11,8457159	2,78204E-05
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - dureté	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ UR (mEq/l)	2,242247645	0,113486417	non significative	ANOVA	6,06238858	0,003666408
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - dureté	BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	0,275832782	0,75943395	non significative	ANOVA	4,33727866	0,015726361
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - SURFACE - mamelonné	BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	1,572382373	0,213197775	non significative	ANOVA	7,80205574	0,00075037
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - SURFACE - mamelonné	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	0,059375383	0,941823348	non significative	ANOVA	3,703415	0,028264898
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - ASPECT	BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	1,213344076	0,301839845	non significative	ANOVA	6,35336026	0,002624002
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - ASPECT	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	1,050705231	0,353718829	non significative	ANOVA	5,06847254	0,008100129
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - COULEUR - brun jaune foncé	BILAN BIOLOGIQUE - Ca UR (mg/24h)	1,551894303	0,217461312	non significative	ANOVA	6,60384006	0,002108008
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 2 - COULEUR - brun jaune foncé	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	0,213001633	0,80372483	non significative	ANOVA	3,27930464	0,041935527
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - rugueuse	BILAN BIOLOGIQUE - ac urique Sg (mg/l)	2,68410026	0,073571958	non significative	ANOVA	4,736558	0,010392457
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - rugueuse	BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	1,201818032	0,305123482	non significative	ANOVA	4,36428005	0,008873569
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,811415371	0,447416532	non significative	ANOVA	3,14476176	0,047794385
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,643646051	0,524716673	non significative	ANOVA	3,94899141	0,022783519
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	BILAN BIOLOGIQUE - ac urique Sg (mg/l)	0,573516703	0,565520439	non significative	ANOVA	3,28555346	0,041807772
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	0,343274332	0,392929272	non significative	ANOVA	5,59352852	0,005010175
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	PATIENT - IMC	0,07115519	0,931385597	non significative	ANOVA	3,43128037	0,035947044
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,208976836	0,811802337	non significative	ANOVA	4,03533904	0,020935324
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,03946	0,961325406	non significative	ANOVA	3,17854213	0,046468541
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - compacte	BILAN BIOLOGIQUE - PTH (pg/ml)	0,496257682	0,610436156	non significative	ANOVA	4,01101511	0,021523786
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - dureté	PATIENT - age	1,127949793	0,341460834	non significative	ANOVA	2,87151626	0,040070093
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - dureté	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,643034503	0,525663324	non significative	ANOVA	5,10396106	0,002665327
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - dureté	BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	0,755372757	0,52158611	non significative	ANOVA	4,34529838	0,006485876
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	PATIENT - IMC	1,263040522	0,294032026	non significative	ANOVA	6,1054017	0,000968113
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,443101779	0,722762089	non significative	ANOVA	3,00140759	0,034655315
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	1,287144805	0,283397726	non significative	ANOVA	4,77380151	0,003847324
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	BILAN BIOLOGIQUE - ac urique Sg (mg/l)	1,180382464	0,321614416	non significative	ANOVA	2,74510331	0,04748704
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - POROSITE	BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	2,343216606	0,077384873	non significative	ANOVA	4,48254685	0,005477658
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	BILAN BIOLOGIQUE - ac urique Sg (mg/l)	1,34936828	0,264434804	non significative	ANOVA	3,18753972	0,045819873
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	PATIENT - age	0,493129534	0,612160507	non significative	ANOVA	3,15075732	0,04701622
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,442031799	0,644148369	non significative	ANOVA	7,7616692	0,000786238
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	0,75900893	0,470918392	non significative	ANOVA	6,1921869	0,002955418
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	1,221780097	0,299293277	non significative	ANOVA	4,54780583	0,012936644
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	2,340514938	0,058051355	non significative	ANOVA	4,46028958	0,014286753
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	BILAN BIOLOGIQUE - densité	2,0783486	0,132380583	non significative	ANOVA	4,31050748	0,009342962
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - couches concentriques fines	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,36519838	0,695105433	non significative	ANOVA	6,47588008	0,002378078
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - couches concentriques fines	BILAN BIOLOGIQUE - ac urique Sg (mg/l)	2,420636967	0,094433732	non significative	ANOVA	6,07336408	0,003318594
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - couches concentriques fines	BILAN BIOLOGIQUE - PH	1,331823447	0,254430743	non significative	ANOVA	4,33472583	0,00947004
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,339674568	0,67170945	non significative	ANOVA	4,21848596	0,017693228
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristalline	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,68764101	0,505441463	non significative	ANOVA	3,24310526	0,043511079
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristalline	BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	1,181393746	0,311271571	non significative	ANOVA	5,82823544	0,004084064
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - microcristalline	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,68764101	0,505441463	non significative	ANOVA	3,24310526	0,043511079
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - microcristalline	BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	1,181393746	0,311271571	non significative	ANOVA	5,82823544	0,004084064
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - Aspect	BILAN BIOLOGIQUE - Ca Sg (mg/l)	2,39298782	0,073143283	non significative	ANOVA	3,58872354	0,016463487
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - Aspect	BILAN BIOLOGIQUE - ac urique Sg (mg/l)	0,519843364	0,663677748	non significative	ANOVA	2,7638322	0,046394838
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - Aspect	BILAN BIOLOGIQUE - densité	0,521730843	0,668640576	non significative	ANOVA	3,12593749	0,030901381
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun foncé	BILAN BIOLOGIQUE - Ca Sg (mg/l)	2,568302533	0,081771386	non significative	ANOVA	3,25803179	0,042668614
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -noire	PATIENT - age	1,165526382	0,315875128	non significative	ANOVA	3,3594572	0,022075716
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -jaune clair	BILAN BIOLOGIQUE - urée UR (mmol/24h)	0,288681366	0,750252465	non significative	ANOVA	3,54452359	0,034870412
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -jaune clair	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	0,677041616	0,510744652	non significative	ANOVA	8,25806722	0,000516619
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun -jaune clair	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ UR (mEq/l)	2,605963444	0,080630131	non significative	ANOVA	8,11675303	0,000656166
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - orange	PATIENT - age	0,431508305	0,613144296	non significative	ANOVA	5,30657463	0,006420435
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - orange	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	2,677567547	0,074328652	non significative	ANOVA	4,3164393	0,016282365
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - orange	BILAN BIOLOGIQUE - PH	2,682321971	0,074405285	non significative	ANOVA	4,73195038	0,011353432
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	PATIENT - IMC	0,835824997	0,437857863	non significative	ANOVA	3,57319648	0,033372716
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	0,426556131	0,653397163	non significative	ANOVA	5,82317436	0,004093636
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	2,708083104	0,07222131	non significative	ANOVA	17,0132185	5,64138E-07
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	BILAN BIOLOGIQUE - PH	0,623119667	0,538788594	non significative	ANOVA	12,3738672	1,27237E-05
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - grège	BILAN BIOLOGIQUE - diurèse (l)	2,698818555	0,072390758	non significative	ANOVA	5,09584104	0,007882703

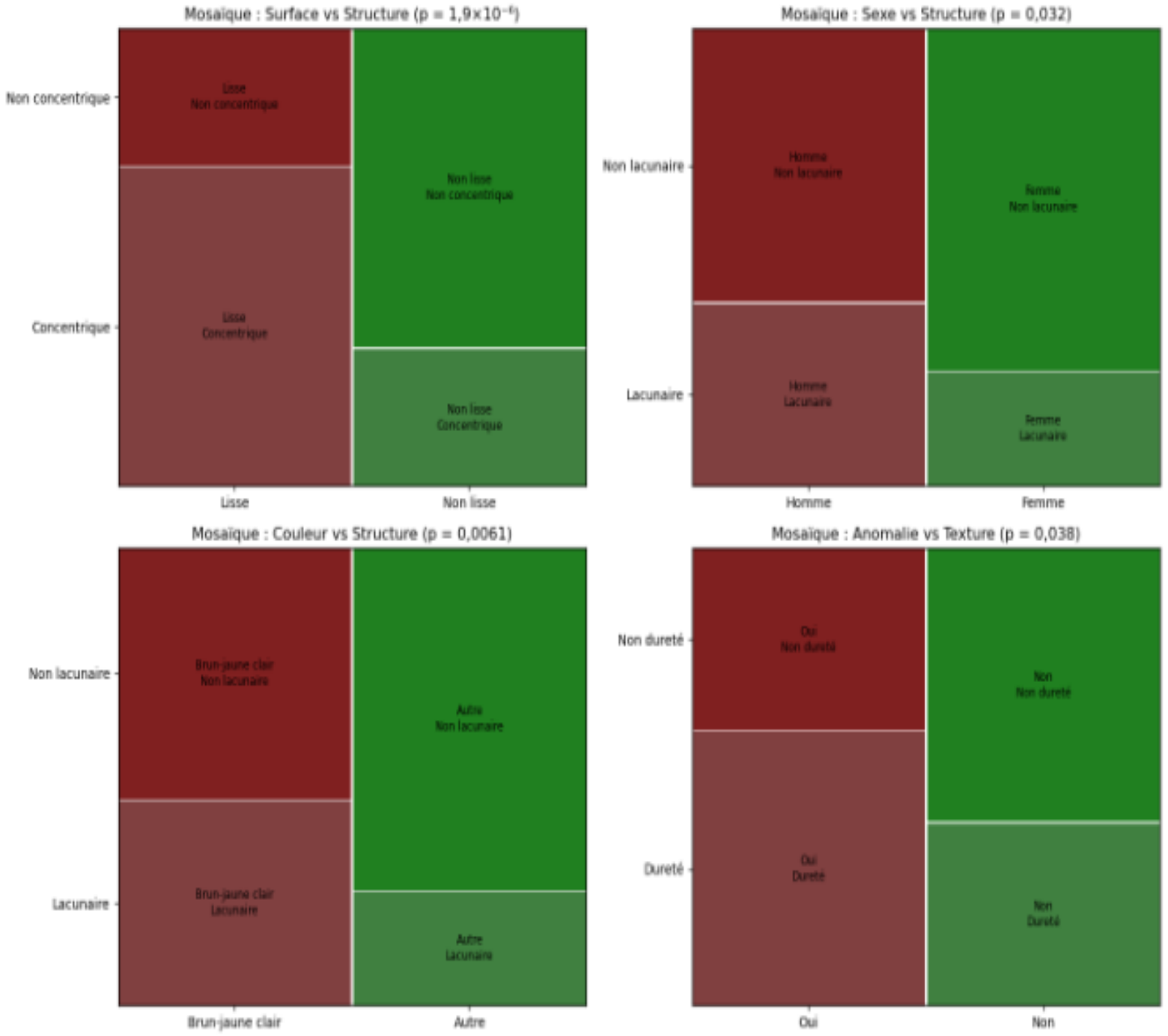
ANNEXE12. Etude des variables quantitatives en fonction des variables qualitatives nominales (suite).

CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - grège	BILAN BIOLOGIQUE - PH	2,009523328	0,140600892	non significative	ANOVA	3,28335042	0,042465627
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE profonde - STRUCTURE - concentrique	BILAN BIOLOGIQUE - Mg UR (mg/24h)	0,196025722	0,659275403	non significative	ANOVA	4,54174873	0,036432678
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE profonde - COULEUR - grège	BILAN BIOLOGIQUE - Mg UR (mg/24h)	0,196025722	0,659275403	non significative	ANOVA	4,54174873	0,036432678
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - compacte	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,74514033	0,477541284	non significative	ANOVA	3,48343879	0,034853392
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - compacte	BILAN BIOLOGIQUE - Mg Sg (mg/l)	2,84621554	0,063358891	non significative	ANOVA	3,12359045	0,049134471
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - compacte	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	1,518304371	0,22476591	non significative	ANOVA	3,45425875	0,035959135
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - compacte	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ sg (mEq/l)	0,294471542	0,74611367	non significative	ANOVA	4,43836014	0,016421195
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dense	PATIENT - IMC	1,430273116	0,246245551	non significative	ANOVA	3,15317007	0,048333406
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dense	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	1,978860734	0,14413033	non significative	ANOVA	3,27885239	0,042167876
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dense	BILAN BIOLOGIQUE - Mg Sg (mg/l)	2,65383313	0,076573241	non significative	ANOVA	3,16382343	0,047539606
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dense	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ sg (mEq/l)	0,406367091	0,668085318	non significative	ANOVA	3,29789907	0,044533183
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dureté	PATIENT - age	1,475735221	0,225652943	non significative	ANOVA	5,65967398	0,001263758
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dureté	BILAN BIOLOGIQUE - urée Sg (g/l)	0,586604514	0,625301377	non significative	ANOVA	2,8813276	0,040032707
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dureté	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	0,387228177	0,40232542	non significative	ANOVA	3,81453829	0,01253343
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dureté	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 UR (mg/24h)	1,767526803	0,159315678	non significative	ANOVA	5,15346398	0,002493285
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dureté	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ sg (mEq/l)	0,302761507	0,823253588	non significative	ANOVA	2,37052893	0,039364966
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - TEXTURE - dureté	BILAN BIOLOGIQUE - PH	1,619157165	0,191351225	non significative	ANOVA	7,24522053	0,000223178
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - rugueux	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,013540453	0,986552794	non significative	ANOVA	3,27482076	0,042326758
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - SURFACE - lisse	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,036612481	0,964064002	non significative	ANOVA	3,232556	0,044080313
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristallisation radiale	PATIENT - age	0,704012217	0,496384059	non significative	ANOVA	6,58645192	0,002040528
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristallisation radiale	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,456123893	0,635176221	non significative	ANOVA	4,55305143	0,012373571
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristallisation radiale	BILAN BIOLOGIQUE - Mg Sg (mg/l)	2,738857076	0,066851752	non significative	ANOVA	3,65661344	0,0302272
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristallisation radiale	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ sg (mEq/l)	0,113462318	0,892350097	non significative	ANOVA	3,53204588	0,036175302
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - concentrique	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,002476665	0,997526466	non significative	ANOVA	3,10649407	0,049536809
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - concentrique	BILAN BIOLOGIQUE - Mg Sg (mg/l)	2,146823229	0,123538732	non significative	ANOVA	3,17183632	0,047247494
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - concentrique	BILAN BIOLOGIQUE - PO4 Sg (mg/l)	0,440116896	0,645267431	non significative	ANOVA	4,06257439	0,020279317
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - concentrique	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ sg (mEq/l)	0,16137865	0,851378635	non significative	ANOVA	3,49867038	0,037259512
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - couches concentriques fines	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,862346636	0,425590971	non significative	ANOVA	4,32887233	0,009281376
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - cristalline	BILAN BIOLOGIQUE - Mg Sg (mg/l)	2,302617936	0,106588379	non significative	ANOVA	3,22166259	0,045117072
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - microcristalline	BILAN BIOLOGIQUE - Mg Sg (mg/l)	2,537304445	0,085428156	non significative	ANOVA	3,19568236	0,046215334
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun foncé	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,488755515	0,614930113	non significative	ANOVA	3,16435321	0,046326706
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun foncé	BILAN BIOLOGIQUE - Mg Sg (mg/l)	2,668681625	0,075514558	non significative	ANOVA	3,1860843	0,046627372
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun foncé	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ sg (mEq/l)	0,145476216	0,86494816	non significative	ANOVA	3,41383775	0,033956323
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun foncé	BILAN BIOLOGIQUE - densité	0,353613624	0,693154721	non significative	ANOVA	3,22323356	0,045226685
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun - noire	PATIENT - age	1,240715349	0,293504054	non significative	ANOVA	5,07821159	0,00789309
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - brun - noire	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,642606357	0,528283213	non significative	ANOVA	3,43382762	0,036500642
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - orange	PATIENT - age	0,632448672	0,533359654	non significative	ANOVA	5,01011573	0,008404057
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - orange	BILAN BIOLOGIQUE - urée Sg (g/l)	2,660481382	0,075233655	non significative	ANOVA	3,12705544	0,048489347
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - orange	BILAN BIOLOGIQUE - créat Sg (mg/l)	0,056363009	0,944662666	non significative	ANOVA	5,41374199	0,006005169
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - orange	BILAN BIOLOGIQUE - Mg Sg (mg/l)	2,717833495	0,072111823	non significative	ANOVA	3,70322396	0,028964139
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - orange	BILAN BIOLOGIQUE - PH	1,093348233	0,337946429	non significative	ANOVA	3,56668044	0,000184372
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - COULEUR - beige à grisatre	BILAN BIOLOGIQUE - Na+ sg (mEq/l)	0,047875501	0,8276121	non significative	ANOVA	5,89642441	0,018469373

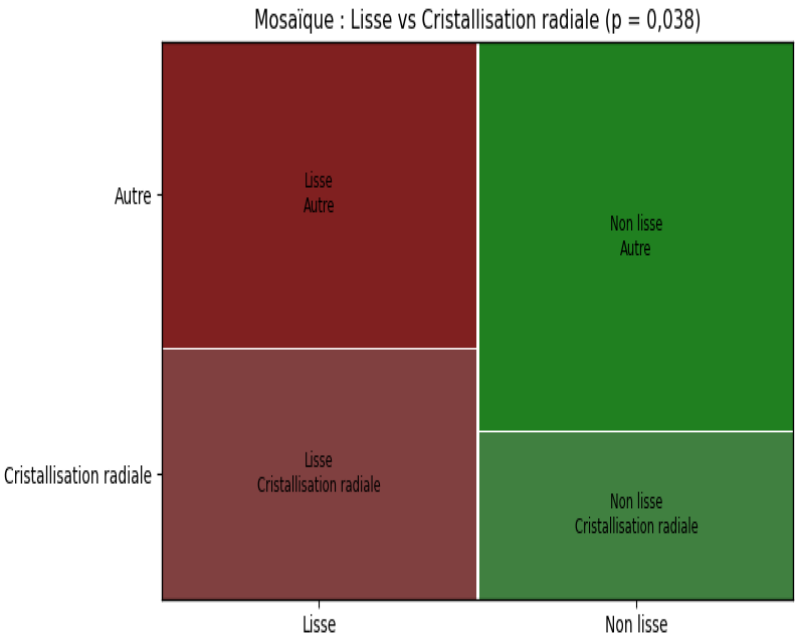
ANNEXE 13 : Étude des variables qualitatives nominales en fonction des variables qualitatives binaires.

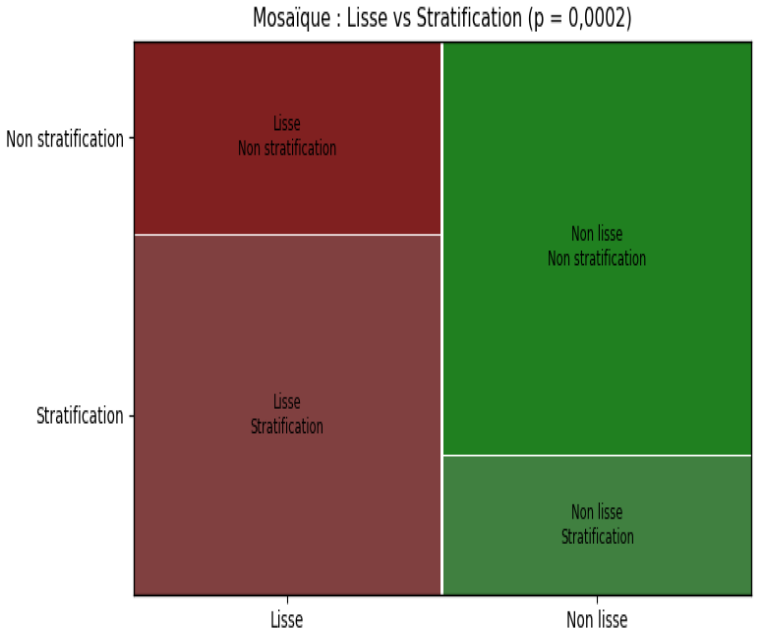
Variable binaire	Variable multimodale	Chi2 Stat	p-value
PATIENT - sexe	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	6,861286803	0,03236611
ANOMALIE METABOLIQUE - oui/non	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - TEXTURE - dureté	8,403591063	0,038367104
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - rugueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	7,935777924	0,018913318
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - rugueuse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	9,251744822	0,009795106
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRATIFICATION	17,0585011	0,000197603
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	6,527638234	0,038242068
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - concentrique	26,33935222	1,90758E-06
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - brun foncé	10,20709697	0,006075151
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - lisse	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DU NOYAU - STRUCTURE - concentrique	10,38290276	0,005563926
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - SURFACE - microcristalline	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - COULEUR - blanche à crème	6,509254564	0,038595203
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - TEXTURE - dureté	33,63892916	4,95906E-08
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristallisation radiale	7,69521541	0,021330705
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	10,45284088	0,005372723
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - cristalline	10,14147967	0,006277774
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - ASPECT	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - microcristalline	10,14147967	0,006277774
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - SURFACE - crayeuse	7,079222755	0,029024605
CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE - ZONE 1 - COULEUR - brun-jaune clair	CARACTERE MORPHOLOGIQUE DE LA SECTION - COUCHE INTERNE - STRUCTURE - lacunaire	10,20506614	0,006081323

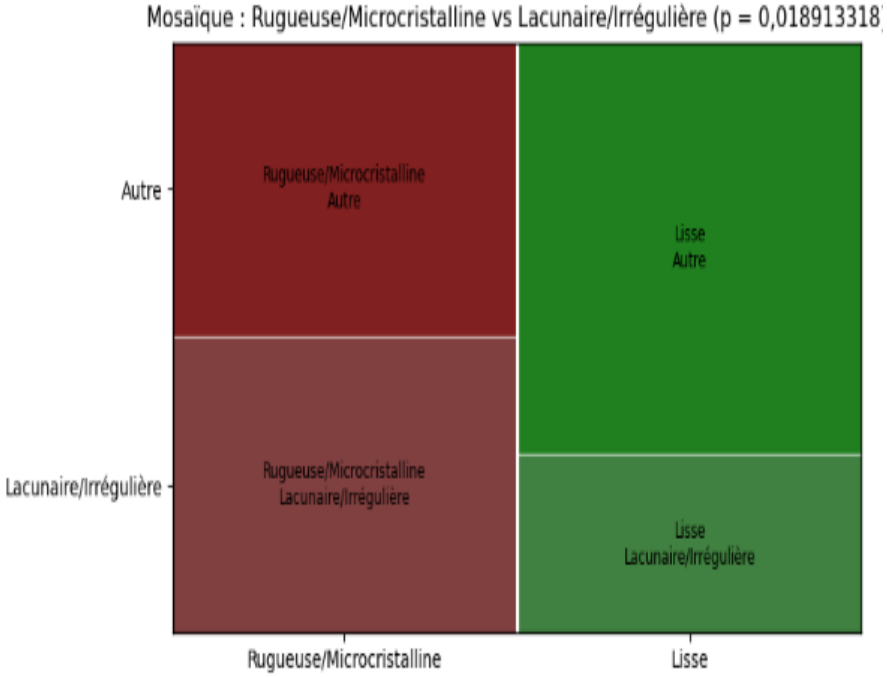
ANNEXE 14 : Diagrammes de mosaïque illustrant les relations significatives entre variables qualitatives binaires et nominales dans les lithiases urinaires



ANNEXE 14. **Diagrammes de mosaïque illustrant les relations significatives entre variables qualitatives binaires et nominales dans les lithiases urinaires (suite)**







ANNEXE 15 : Performances globales des modèles

Méthode	Modèle	Composé	RMSE_SC	MAPE_SC (%)	R2_SC	RMSE_SV	MAPE_SV (%)	R2_SV
ANOVA	PLS	C1	12,140835	36,6177913	0,8336591	10,528677	30,1829107	0,878128
ANOVA	PLS	C2	13,275745	39,0968075	0,7648593	11,646845	33,0809025	0,8110738
ANOVA	PLS	CALCITE	1,6865397	6,46246705	0,9569336	3,0954916	7,78513254	0,8188938
ANOVA	PLS	AU0	10,481916	35,846001	0,8321262	9,7201315	39,2641057	0,7607461
ANOVA	PLS	AU2	5,2888166	36,2651523	0,8612831	5,5124906	35,8585785	0,8415599
ANOVA	PLS	URATE	7,7751944	32,9777322	0,867262	8,7407667	34,6621447	0,8361959
ANOVA	PLS	CARBAPATITE	10,570867	31,8775046	0,862324	10,439826	32,6910001	0,8612872
ANOVA	PLS	STRUVIT	7,8676864	35,8339735	0,7908561	7,7385988	26,3644537	0,857406
ANOVA	PLS	BRUSHITE	6,329349	40,3432502	0,9107287	7,0936518	51,1746482	0,8669768
ANOVA	PLS	CYSTINE	5,8910443	62,8619055	0,4745521	5,7197732	63,4296431	0,3816538
ANOVA	PLS	AMOXICILLINE	0,4230183	1,35982857	0,9954965	0,526761	1,53854825	0,9982329
ANOVA	Ridge	C1	4,8110978	15,852318	0,973879	3,7328718	10,1759771	0,9846806
ANOVA	Ridge	C2	11,314029	32,4477961	0,8292171	9,6004595	23,4780464	0,8716312
ANOVA	Ridge	CALCITE	0,1364095	0,24855894	0,9997183	0,1654683	0,08258784	0,9994825
ANOVA	Ridge	AU0	4,5986926	14,8445075	0,9676875	3,7388761	15,9964767	0,9646005
ANOVA	Ridge	AU2	2,8745321	24,8662617	0,9590224	2,5269696	25,6491167	0,9667057
ANOVA	Ridge	URATE	3,2863087	17,2920264	0,9762868	3,3473555	19,1427255	0,9759769
ANOVA	Ridge	CARBAPATITE	6,2663185	20,0091783	0,9516204	6,4475589	22,8255674	0,9470921
ANOVA	Ridge	STRUVIT	2,4802236	11,6689263	0,9792158	2,6687229	9,33764264	0,9830417
ANOVA	Ridge	BRUSHITE	2,7479459	16,3725251	0,9831729	3,181284	21,1486182	0,9732458
ANOVA	Ridge	CYSTINE	0,2097919	0,31924715	0,9993336	0,2504482	0,42214827	0,9988145
ANOVA	Ridge	AMOXICILLINE	0,1045832	0,06160778	0,9997247	0,1090749	0,16918486	0,9999242
ANOVA	SVR	C1	10,397407	24,4518342	0,8780022	9,4709125	22,4449072	0,9013856
ANOVA	SVR	C2	13,514142	30,540528	0,7563385	11,151217	28,4826435	0,8268111
ANOVA	SVR	CALCITE	3,1579063	38,7169108	0,8490116	2,9435632	38,720565	0,8362351
ANOVA	SVR	AU0	8,3020553	17,0330111	0,8946892	5,8150398	17,4712634	0,9143711
ANOVA	SVR	AU2	6,0370449	26,2555029	0,8192571	5,5357886	31,4667272	0,8402178
ANOVA	SVR	URATE	7,114067	24,1199575	0,8888758	8,1766356	25,1065299	0,8566575
ANOVA	SVR	CARBAPATITE	7,9977222	19,9300149	0,9211921	9,5840575	23,2937662	0,8830961
ANOVA	SVR	STRUVIT	7,3155518	42,2264513	0,8191805	7,343435	32,1017916	0,8715971
ANOVA	SVR	BRUSHITE	3,5119941	18,732791	0,9725146	4,7911756	32,7109709	0,9393163
ANOVA	SVR	CYSTINE	6,8674318	84,2093314	0,2859415	6,1420513	84,1952407	0,2869812
ANOVA	SVR	AMOXICILLINE	4,164454	65,9245485	0,5635357	8,3367459	65,9447982	0,5573955
Correlation	PLS	C1	12,140835	36,6177913	0,8336591	10,528677	30,1829107	0,878128
Correlation	PLS	C2	13,275745	39,0968075	0,7648593	11,646845	33,0809025	0,8110738
Correlation	PLS	CALCITE	1,6865397	6,46246705	0,9569336	3,0954916	7,78513254	0,8188938
Correlation	PLS	AU0	10,481916	35,846001	0,8321262	9,7201315	39,2641057	0,7607461
Correlation	PLS	AU2	5,2888166	36,2651523	0,8612831	5,5124906	35,8585785	0,8415599
Correlation	PLS	URATE	7,7751944	32,9777322	0,867262	8,7407667	34,6621447	0,8361959
Correlation	PLS	CARBAPATITE	10,570867	31,8775046	0,862324	10,439826	32,6910001	0,8612872
Correlation	PLS	STRUVIT	7,8676864	35,8339735	0,7908561	7,7385988	26,3644537	0,857406
Correlation	PLS	BRUSHITE	6,329349	40,3432502	0,9107287	7,0936518	51,1746482	0,8669768
Correlation	PLS	CYSTINE	5,332864	52,0327298	0,5694079	5,1970466	52,4214224	0,4895099
Correlation	PLS	AMOXICILLINE	0,4727492	1,9925014	0,9943754	0,5557252	2,1376856	0,9980333
Correlation	Ridge	C1	5,077571	16,3307574	0,9709053	4,7209565	12,9575638	0,9754972
Correlation	Ridge	C2	11,250082	32,6151403	0,8311421	10,08782	25,130208	0,8582672
Correlation	Ridge	CALCITE	0,1613541	0,23822604	0,9996058	0,2250686	0,03093766	0,9990426
Correlation	Ridge	AU0	4,5940781	14,4155883	0,9677523	6,3843158	17,4184542	0,8967848
Correlation	Ridge	AU2	3,08918	27,2903315	0,9526741	3,8127135	34,4699794	0,9242055
Correlation	Ridge	URATE	3,6124885	19,3691743	0,971346	4,0231734	21,5584074	0,9652973
Correlation	Ridge	CARBAPATITE	6,293577	20,6027772	0,9511986	7,0164664	25,3312757	0,9373434
Correlation	Ridge	STRUVIT	2,6920777	12,4250622	0,9755135	3,5352572	12,3513472	0,970241
Correlation	Ridge	BRUSHITE	2,908241	17,2055643	0,9811525	4,2374511	27,9976114	0,9525324
Correlation	Ridge	CYSTINE	0,2230237	0,35778243	0,9992469	0,3096787	0,46815931	0,9981874
Correlation	Ridge	AMOXICILLINE	0,1084341	0,19560962	0,9997041	0,1424827	0,28401504	0,9998707
Correlation	SVR	C1	5,230211	12,2394059	0,9691297	4,6088736	8,10719084	0,9766468
Correlation	SVR	C2	6,876624	10,1373389	0,93691	4,9064371	8,06720425	0,966472
Correlation	SVR	CALCITE	0,1191286	0,87364311	0,9997851	0,5383615	1,63539208	0,994522
Correlation	SVR	AU0	3,9486641	6,98685215	0,9761767	2,5325003	6,62491714	0,983759
Correlation	SVR	AU2	1,7685426	8,9683406	0,9844889	1,9914519	17,2476167	0,979322
Correlation	SVR	URATE	3,6009934	8,27151627	0,971528	4,5320738	11,0544952	0,9559628
Correlation	SVR	CARBAPATITE	2,6942371	5,23695297	0,9910565	5,1328557	8,96423666	0,9664689
Correlation	SVR	STRUVIT	2,2196211	6,82029989	0,983354	2,3363963	6,54448659	0,9870022
Correlation	SVR	BRUSHITE	1,1169569	5,8483362	0,9972199	2,266798	14,7318895	0,9864165
Correlation	SVR	CYSTINE	0,2957168	1,17302424	0,998676	0,3687235	1,24746756	0,9974303
Correlation	SVR	AMOXICILLINE	0,0088437	0,01235516	0,999998	0,2930312	0,17460689	0,9994532

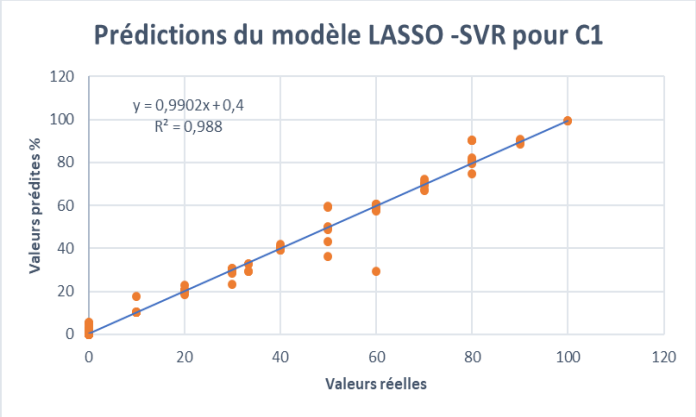
ANNEXE 15. Performances globales des modèles (suite)

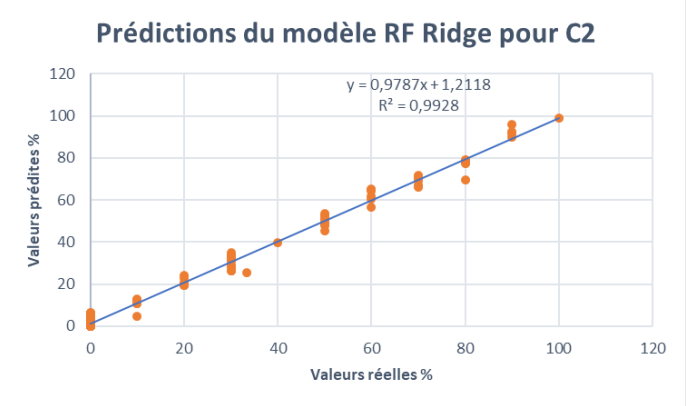
FULL	PLS	C1	16,292146	43,4807407	0,7004575	15,472237	33,9803275	0,7368141
FULL	PLS	C2	22,626318	50,0359147	0,3169733	22,658115	48,3558905	0,2849718
FULL	PLS	CALCITE	2,421033	13,4352989	0,9112545	3,5801561	14,8925454	0,7577421
FULL	PLS	AU0	12,368934	43,8761803	0,7662422	10,359665	49,8855596	0,728227
FULL	PLS	AU2	12,255182	56,1449067	0,255179	11,23566	57,0324505	0,3417869
FULL	PLS	URATE	7,7019664	36,3928916	0,8697505	8,6069695	39,4778316	0,8411723
FULL	PLS	CARBAPATITE	21,06349	53,6930682	0,4533647	21,422024	43,8002355	0,4159486
FULL	PLS	STRUVIT	8,8484692	41,5056056	0,7354624	9,0438959	33,9414489	0,8052455
FULL	PLS	BRUSHITE	10,584313	57,6079247	0,7503572	12,180969	71,3349655	0,6077606
FULL	PLS	CYSTINE	0,5799312	1,053061	0,9949079	0,6979858	1,43051027	0,990792
FULL	PLS	AMOXICILLINE	2,3472463	22,1121232	0,8613404	4,7461597	22,3378731	0,8565477
FULL	Ridge	C1	4,4326977	14,3339013	0,9778263	3,9641909	10,707835	0,9827231
FULL	Ridge	C2	4,9931509	17,5954263	0,9667372	9,7848809	17,7831011	0,8666519
FULL	Ridge	CALCITE	0,1047802	0,08485982	0,9998338	0,1529058	0,20492611	0,9995581
FULL	Ridge	AU0	4,0161459	12,6675254	0,9753555	8,1127121	17,6821535	0,833334
FULL	Ridge	AU2	2,3650377	20,6528663	0,9722611	3,241244	25,441456	0,9452237
FULL	Ridge	URATE	3,0749879	16,2138013	0,9792385	3,6912271	19,9965775	0,9707876
FULL	Ridge	CARBAPATITE	4,4873041	15,396288	0,9751911	6,1201464	20,8156313	0,9523291
FULL	Ridge	STRUVIT	2,259839	9,96941669	0,9827454	3,2000207	11,7773519	0,9756173
FULL	Ridge	BRUSHITE	2,3053022	14,188619	0,9881573	3,4923409	21,4483302	0,9677581
FULL	Ridge	CYSTINE	0,1558996	0,21604194	0,999632	0,2489892	0,29564815	0,9988282
FULL	Ridge	AMOXICILLINE	0,0589884	0,08428688	0,9999124	0,0785838	0,15305102	0,9999607
Full	SVR	C1	12,574707	28,7758656	0,8215578	11,468464	25,9201124	0,8554004
Full	SVR	C2	14,893386	30,6819592	0,7040647	12,886745	31,3399146	0,7687072
Full	SVR	CALCITE	4,0264641	49,363364	0,7545332	3,7985029	51,9145346	0,7272913
Full	SVR	AU0	7,8829394	16,334602	0,9050537	5,4856073	17,3579491	0,9237984
Full	SVR	AU2	6,296229	26,3893443	0,8034046	5,8830664	33,1397777	0,8195417
Full	SVR	URATE	7,8425539	24,0469407	0,8649521	8,9508968	26,1127199	0,8282254
Full	SVR	CARBAPATITE	9,4119467	20,0325751	0,890857	11,849225	25,645623	0,821306
Full	SVR	STRUVIT	7,9915816	47,679347	0,7842173	8,4623125	37,0701507	0,8294881
Full	SVR	BRUSHITE	4,962266	17,9184229	0,9451276	6,2703501	24,6167517	0,8960628
Full	SVR	CYSTINE	6,7484102	82,7498562	0,3104782	6,0370054	82,7566938	0,3111618
Full	SVR	AMOXICILLINE	4,9966345	79,0948274	0,37167	9,9971356	79,1321698	0,3635359
Lasso	PLS	C1	13,966798	39,1633447	0,7798617	12,701187	33,2386402	0,8226443
Lasso	PLS	C2	13,309627	42,4529762	0,7636576	11,824657	33,1446669	0,8052611
Lasso	PLS	CALCITE	1,6813937	6,43337963	0,957196	2,3206719	8,37058474	0,8982108
Lasso	PLS	AU0	10,481961	38,2460543	0,8321247	9,1972068	40,3527019	0,7857964
Lasso	PLS	AU2	5,7649234	35,2983583	0,835184	5,5624906	32,3167586	0,8386727
Lasso	PLS	URATE	7,2547165	33,9734865	0,8844383	8,2834525	41,3381204	0,8528878
Lasso	PLS	CARBAPATITE	12,38807	30,6897035	0,8109205	14,430854	35,7715575	0,7349583
Lasso	PLS	STRUVIT	8,4459884	37,3921659	0,7589806	8,483628	29,5964297	0,8286281
Lasso	PLS	BRUSHITE	5,742436	34,473309	0,9265171	6,5969255	44,4978696	0,8849542
Lasso	PLS	CYSTINE	3,6832623	30,2244042	0,7945953	3,3382926	30,5171919	0,7893687
Lasso	PLS	AMOXICILLINE	2,2622655	20,0731642	0,8711988	3,8678362	20,4631033	0,9047294
Lasso	Ridge	C1	5,6547277	18,718971	0,9639151	4,5864018	11,8641685	0,976874
Lasso	Ridge	C2	6,3364668	21,1054287	0,9464321	5,4792024	18,3654498	0,9581871
Lasso	Ridge	CALCITE	0,2880915	0,28375427	0,9987434	0,3333409	0,86068724	0,9978998
Lasso	Ridge	AU0	5,0395232	16,0376697	0,9611956	4,1564318	16,5454812	0,9562522
Lasso	Ridge	AU2	3,620429	31,3212501	0,9349971	3,2985481	35,5788862	0,9432697
Lasso	Ridge	URATE	4,1553089	22,9072364	0,9620878	4,4344915	22,5515975	0,9578388
Lasso	Ridge	CARBAPATITE	5,7796784	19,3977462	0,9588429	5,7691327	21,8827343	0,9576405
Lasso	Ridge	STRUVIT	3,2425165	14,5865196	0,9644765	3,6386119	11,9067597	0,9684755
Lasso	Ridge	BRUSHITE	3,0010243	18,2969505	0,9799307	3,5861713	21,5107288	0,9660023
Lasso	Ridge	CYSTINE	0,3526957	0,67794646	0,9981166	0,4325712	0,63446065	0,9964634
Lasso	Ridge	AMOXICILLINE	0,1918705	0,17842538	0,9990735	0,1816515	0,27936616	0,9997899
Lasso	SVR	C1	4,0345693	8,74658567	0,9816305	3,3079454	5,45730227	0,9879698
Lasso	SVR	C2	5,1836491	6,56249104	0,9641507	3,6055008	4,31398978	0,9818947
Lasso	SVR	CALCITE	0,3119057	0,29052969	0,998527	0,3583678	0,56062645	0,9975727
Lasso	SVR	AU0	3,0900432	5,60374517	0,9854108	1,6286727	4,36900525	0,9932829
Lasso	SVR	AU2	1,8826557	8,32466345	0,9824226	1,8575207	15,3874981	0,9820098
Lasso	SVR	URATE	2,604094	6,74823208	0,9851103	2,4386751	6,77267856	0,9872493
Lasso	SVR	CARBAPATITE	1,8778848	4,12570853	0,9956551	1,233317	3,55275489	0,9980641
Lasso	SVR	STRUVIT	2,1794359	7,64250257	0,9839513	1,6862533	3,53359569	0,9932295
Lasso	SVR	BRUSHITE	0,4200984	1,65955934	0,9996067	0,4213424	1,79455456	0,9995307
Lasso	SVR	CYSTINE	0,0271375	0,15595589	0,9999888	0,020575	0,22647618	0,999992
Lasso	SVR	AMOXICILLINE	0,014401	0,15112918	0,9999948	0,0235294	0,14862852	0,9999965

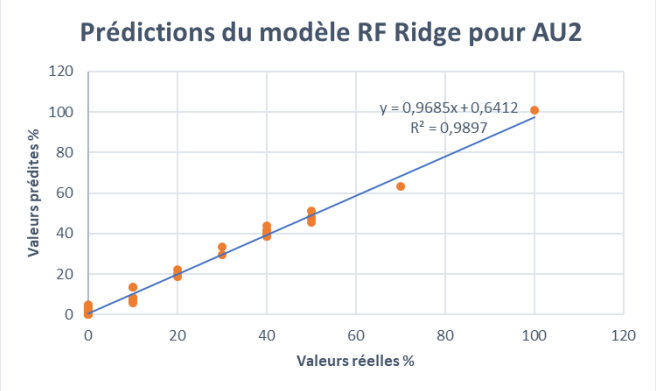
ANNEXE 15. Performances globales des modèles (suite)

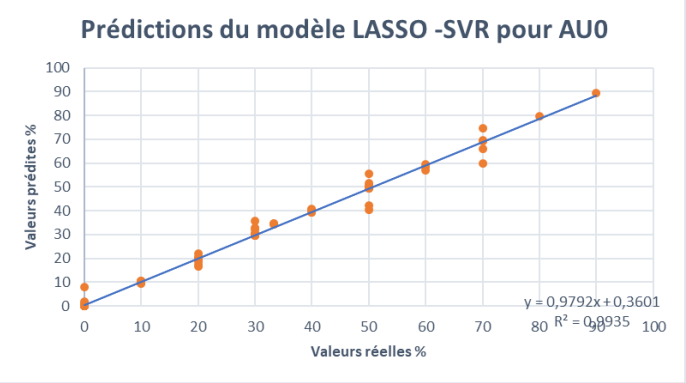
RFE	PLS	C1	10,073994	31,3776767	0,8854737	8,5987487	23,1488059	0,9187119
RFE	PLS	C2	11,194671	34,7282938	0,8328014	9,9034316	31,9657297	0,8634012
RFE	PLS	CALCITE	0,7641379	1,85189443	0,9911593	0,7935875	1,72585152	0,9880968
RFE	PLS	AU0	7,8326127	25,1122339	0,9062622	7,6052165	31,1370295	0,8535336
RFE	PLS	AU2	4,8566743	37,2602414	0,8830257	4,4765185	39,1901421	0,8955159
RFE	PLS	URATE	6,0569612	30,1305448	0,9194469	6,1824477	30,5343945	0,9180504
RFE	PLS	CARBAPATITE	10,232107	29,6396731	0,8710067	9,816211	29,2450441	0,877364
RFE	PLS	STRUVIT	6,083308	25,770902	0,8749653	6,1552033	22,377069	0,9097886
RFE	PLS	BRUSHITE	4,9291057	27,8583595	0,9458585	5,5585553	38,3732476	0,9183208
RFE	PLS	CYSTINE	1,2657293	4,99070381	0,9757436	1,2657865	4,9499187	0,9697173
RFE	PLS	AMOXICILLINE	0,3956365	0,38710636	0,9960606	0,3771729	0,5264773	0,9990941
RFE	Ridge	C1	4,8811865	16,2837343	0,9731124	4,2245318	11,8547853	0,9803793
RFE	Ridge	C2	5,3498332	19,0193012	0,9618152	11,395358	18,44726	0,8191446
RFE	Ridge	CALCITE	0,1236632	0,1069673	0,9997685	0,1699123	0,25959217	0,9994543
RFE	Ridge	AU0	4,228893	13,3125096	0,9726753	9,3597651	17,5394333	0,7781575
RFE	Ridge	AU2	2,6375621	22,5245864	0,9655001	4,0186756	28,0127253	0,9157955
RFE	Ridge	URATE	3,3527763	17,4939283	0,9753179	4,0142927	20,4023618	0,9654503
RFE	Ridge	CARBAPATITE	5,1597842	17,4135518	0,967198	6,3666912	21,0831568	0,9484109
RFE	Ridge	STRUVIT	2,6096852	11,8393486	0,9769894	3,4920749	12,7421742	0,9709635
RFE	Ridge	BRUSHITE	2,5065856	15,8869226	0,985999	3,6675253	24,2741271	0,9644423
RFE	Ridge	CYSTINE	0,1844807	0,24492026	0,9994847	0,3598844	0,33756338	0,9975521
RFE	Ridge	AMOXICILLINE	0,0778488	0,09237994	0,9998475	0,1382302	0,17753476	0,9998783
RFE	SVR	C1	4,2910759	9,25031308	0,9792205	3,9416832	6,82153482	0,9829187
RFE	SVR	C2	4,4004047	8,03161779	0,9741658	3,5559901	7,50474152	0,9823885
RFE	SVR	CALCITE	0,06038	0,09982608	0,9999448	0,5958012	0,14808795	0,9932907
RFE	SVR	AU0	3,2215593	6,79637875	0,9841425	2,1551936	6,73182113	0,9882378
RFE	SVR	AU2	1,7627357	8,46999241	0,9845906	1,9920039	15,8073632	0,9793105
RFE	SVR	URATE	4,2778408	11,0864926	0,9598189	5,0134867	13,5439491	0,9461103
RFE	SVR	CARBAPATITE	2,5468607	5,28746136	0,9920081	5,1951647	8,10835615	0,9656498
RFE	SVR	STRUVIT	2,717805	8,99719478	0,9750433	2,4155619	6,64110578	0,9861065
RFE	SVR	BRUSHITE	0,8085435	4,67980587	0,9985432	1,7029425	13,9385712	0,9923337
RFE	SVR	CYSTINE	0,0564069	0,0828179	0,9999518	0,3839047	0,21926023	0,9972144
RFE	SVR	AMOXICILLINE	0,0572425	0,09322873	0,9999175	0,5253324	0,12124686	0,9982425
RF	PLS	C1	11,023267	36,9952529	0,8628731	9,9447644	32,5921154	0,891271
RF	PLS	CALCITE	1,5322506	5,44906208	0,9644529	1,8377832	8,79412562	0,9361644
RF	PLS	AU0	9,9974196	37,4012857	0,8472865	9,3663592	42,623878	0,7778448
RF	PLS	AU2	5,8294835	41,0460299	0,8314718	5,568923	37,2747857	0,8382994
RF	PLS	URATE	6,8816837	31,0801726	0,896017	7,7196689	35,5702261	0,8722317
RF	PLS	CARBAPATITE	10,625252	29,2264671	0,8609037	11,01962	30,0757271	0,845452
RF	PLS	STRUVIT	8,0481605	34,6139219	0,7811511	7,7070219	26,5789559	0,8585674
RF	PLS	BRUSHITE	5,9947836	36,8230853	0,9199169	7,0719309	52,0833793	0,8677902
RF	PLS	CYSTINE	4,0070195	35,7645188	0,7568983	3,7929796	36,3888399	0,7280838
RF	PLS	AMOXICILLINE	1,1235329	8,34270275	0,968231	2,2356932	8,42539148	0,9681692
RF	Ridge	C1	7,7192146	25,6979024	0,9327568	6,4732277	18,2904786	0,9539321
RF	Ridge	C2	2,6766488	8,69484661	0,9904414	2,4550962	7,15209137	0,9916052
RF	Ridge	CALCITE	0,0604072	0,07863664	0,9999448	0,0596609	0,03565383	0,9999327
RF	Ridge	AU0	2,5130269	8,42112873	0,9903507	2,5226272	11,8669728	0,9838853
RF	Ridge	AU2	1,6604312	13,4066136	0,9863273	1,522173	12,9733709	0,9879192
RF	Ridge	URATE	2,0955582	9,90131717	0,9903579	2,0017749	11,0245056	0,9914088
RF	Ridge	CARBAPATITE	3,2001988	10,4899461	0,987382	3,3219118	13,109303	0,9859555
RF	Ridge	STRUVIT	1,5411808	6,00415823	0,9919748	1,6537072	5,16118909	0,9934883
RF	Ridge	BRUSHITE	1,1118714	5,67669277	0,9972451	1,0570293	5,34107249	0,9970463
RF	Ridge	CYSTINE	0,0925211	0,11046385	0,9998704	0,0992496	0,09173951	0,9998138
RF	Ridge	AMOXICILLINE	0,0369436	0,07108808	0,9999657	0,0379826	0,12212937	0,9999908
RF	SVR	C1	3,7215147	7,29060898	0,9843706	4,1147551	6,86128316	0,9813858
RF	SVR	C2	4,7175666	6,12997184	0,9703076	3,8142411	6,19278917	0,9797376
RF	SVR	CALCITE	0,0061126	0,02402746	0,9999994	0,541653	0,13621066	0,9944548
RF	SVR	AU0	3,2887136	5,45298221	0,9834745	2,3313354	6,14778191	0,9862366
RF	SVR	AU2	1,5872882	6,40550668	0,9875054	1,9463719	14,9176125	0,9802476
RF	SVR	URATE	3,1002328	8,21816675	0,9788962	3,5943937	8,64827967	0,9723002
RF	SVR	CARBAPATITE	2,1702797	4,93508313	0,9941968	5,0249536	8,18781993	0,9678638
RF	SVR	STRUVIT	2,6062163	8,81715332	0,9770506	2,2838744	6,38068944	0,98758
RF	SVR	BRUSHITE	0,5793559	3,47814328	0,999252	1,0365705	6,95401557	0,9971596
RF	SVR	CYSTINE	0,0424881	0,12608746	0,9999727	0,1542462	0,20322319	0,9995503
RF	SVR	AMOXICILLINE	0,0077196	0,04251702	0,9999985	0,2865095	0,18374074	0,9994772

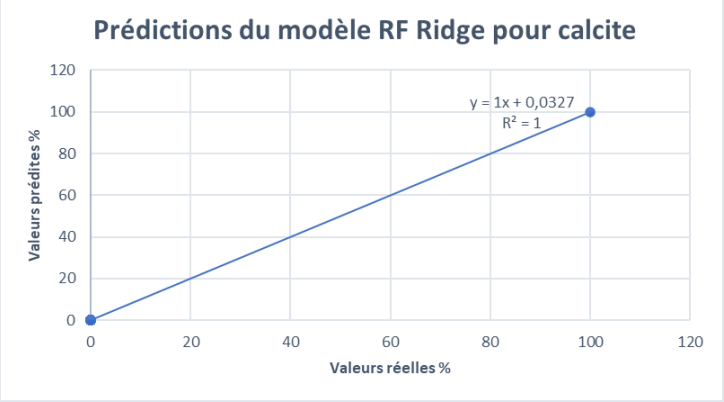
ANNEXE 16 : Meilleurs modèles

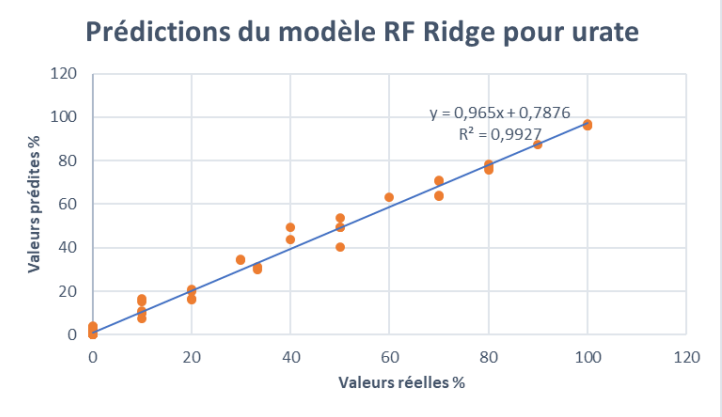




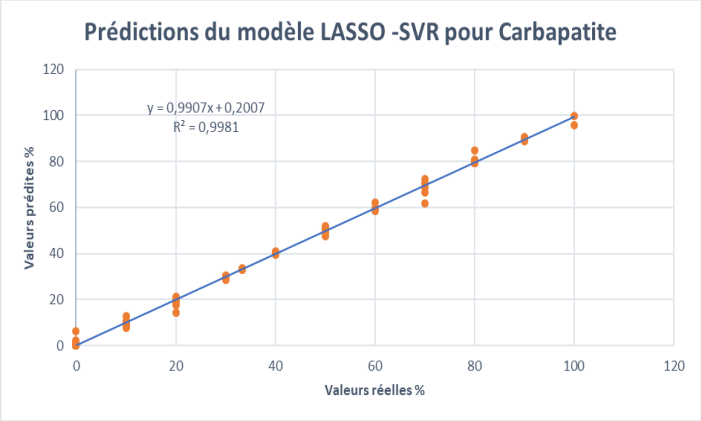


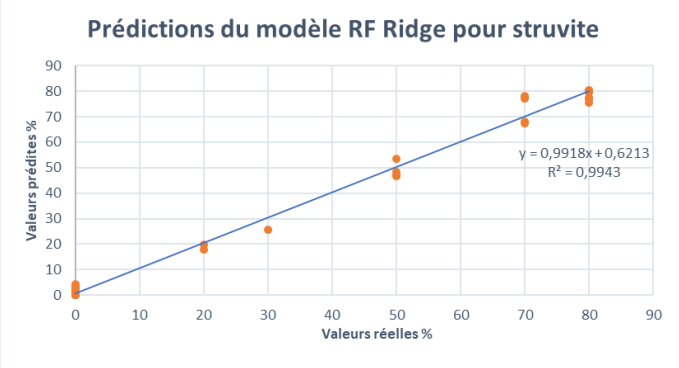


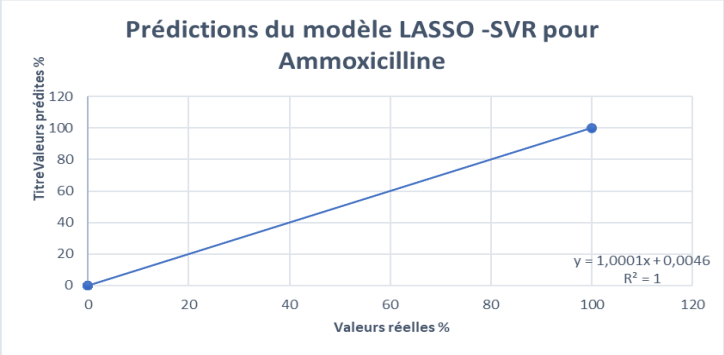


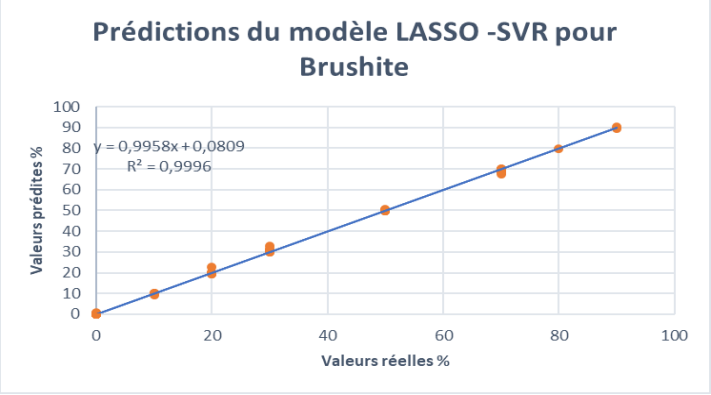


ANNEXE 16. Meilleurs modèles





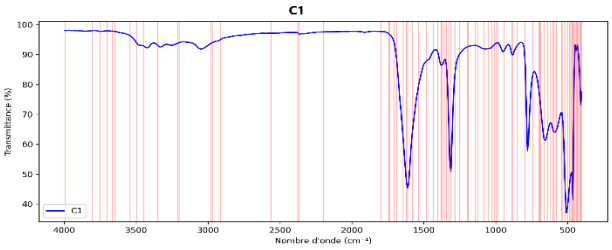


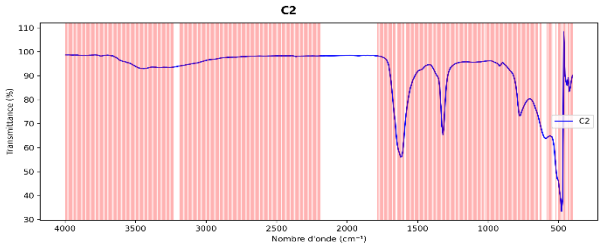


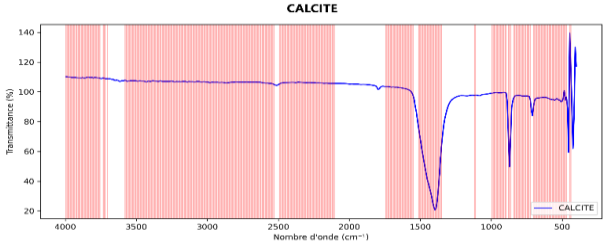
ANNEXE 17 : Variables sélectionnées avec les meilleurs modèles pour chaque composé

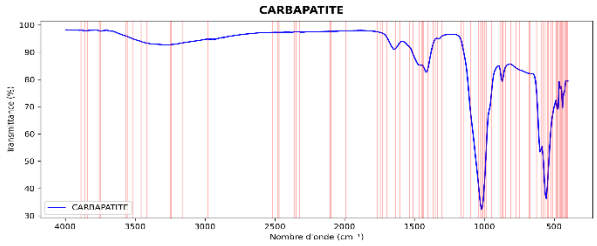
variables selectionée										
lasso-SVR	lasso-SVR	RF Ridge	lasso-SVR	lasso-SVR	RF Ridge	RF Ridge	lasso-SVR	RF Ridge	RF Ridge	lasso-SVR
ammoxicilline	AU0	AU2	brushite	C1	C2	calcite	carbapatite	struvite	urate	cystine
401.193728	401.193728	401.193728	401.193728	401.193728	401.193728	439.770048	401.193728	401.193728	401.193728	424.33952
416.624256	408.908992	408.908992	416.624256	408.908992	408.908992	447.485312	408.908992	408.908992	408.908992	439.770048
424.33952	416.624256	416.624256	424.33952	416.624256	416.624256	470.631104	416.624256	416.624256	416.624256	447.485312
447.485312	432.054784	424.33952	432.054784	424.33952	424.33952	478.346368	424.33952	424.33952	424.33952	455.200576
455.200576	447.485312	432.054784	439.770048	432.054784	432.054784	486.061632	432.054784	432.054784	432.054784	470.631104
470.631104	455.200576	439.770048	447.485312	439.770048	447.485312	493.776896	439.770048	439.770048	439.770048	493.776896
493.776896	462.91584	447.485312	455.200576	447.485312	455.200576	501.49216	447.485312	447.485312	447.485312	532.353216
509.207424	470.631104	455.200576	462.91584	455.200576	462.91584	509.207424	455.200576	455.200576	455.200576	555.499008
617.22112	478.346368	462.91584	470.631104	462.91584	478.346368	516.922688	462.91584	470.631104	462.91584	609.505856
771.5264	486.061632	470.631104	486.061632	470.631104	486.061632	524.637952	470.631104	478.346368	478.346368	632.651648
802.387456	493.776896	478.346368	524.637952	478.346368	493.776896	532.353216	478.346368	486.061632	486.061632	648.082176
902.685888	509.207424	486.061632	532.353216	486.061632	501.49216	540.06848	486.061632	493.776896	493.776896	671.227968
1018.414848	532.353216	493.776896	563.214272	501.49216	516.922688	547.783744	509.207424	501.49216	501.49216	694.37376
1026.130112	540.06848	501.49216	578.6448	516.922688	547.783744	555.499008	524.637952	509.207424	509.207424	717.519552
1033.845376	570.929536	509.207424	601.790592	532.353216	555.499008	563.214272	540.06848	516.922688	516.922688	779.241664
1056.991168	594.075328	516.922688	609.505856	540.06848	563.214272	570.929536	547.783744	524.637952	524.637952	802.387456
1126.428544	601.790592	524.637952	617.22112	578.6448	570.929536	578.6448	563.214272	532.353216	532.353216	817.817984
1134.143808	617.22112	532.353216	709.804288	594.075328	578.6448	586.360064	578.6448	540.06848	540.06848	840.963776
1157.2896	624.936384	540.06848	756.095872	601.790592	624.936384	594.075328	594.075328	578.6448	547.783744	856.394304
1249.872768	648.082176	547.783744	779.241664	617.22112	632.651648	601.790592	624.936384	586.360064	555.499008	864.109568
1311.59488	686.658496	555.499008	848.67904	640.366912	648.082176	609.505856	671.227968	594.075328	563.214272	894.970624
1442.754368	717.519552	563.214272	864.109568	663.512704	655.79744	617.22112	678.943232	601.790592	570.929536	918.116416
1527.622272	740.665344	570.929536	871.824832	686.658496	663.512704	624.936384	748.380608	609.505856	578.6448	1026.130112
1581.62912	748.380608	578.6448	948.977472	694.37376	671.227968	632.651648	771.5264	617.22112	586.360064	1110.998016
1643.351232	763.811136	586.360064	972.123264	702.089024	678.943232	640.366912	810.10272	624.936384	594.075328	1188.150656
1735.9344	786.956928	594.075328	987.553792	740.665344	686.658496	648.082176	848.67904	632.651648	601.790592	1242.157504
1743.649664	802.387456	601.790592	1010.693584	794.672192	694.37376	655.79744	864.109568	640.366912	609.505856	1296.164352
1774.51072	840.963776	617.22112	1018.414848	848.67904	702.089024	663.512704	871.824832	648.082176	617.22112	1334.740672
1797.656512	871.824832	624.936384	1026.130112	879.540096	709.804288	671.227968	887.25536	655.79744	624.936384	1404.178048
1805.371776	879.540096	640.366912	1041.56064	887.25536	717.519552	678.943232	948.977472	663.512704	632.651648	1427.32384
2978.091904	894.970624	648.082176	1064.706432	941.262208	725.234816	686.658496	987.553792	671.227968	640.366912	1481.330688
3433.29248	925.83168	678.943232	1110.998016	987.553792	732.95008	694.37376	995.269056	678.943232	648.082176	1589.344384
3842.201472	948.977472	686.658496	1126.428544	995.269056	740.665344	702.089024	1010.699584	686.658496	655.79744	1728.219136
	1002.98432	694.37376	1165.004864	1010.699584	748.380608	725.234816	1018.414848	694.37376	663.512704	1735.9344
	1026.130112	702.089024	1180.435392	1026.130112	756.095872	732.95008	1026.130112	702.089024	671.227968	1766.795456
	1033.845376	709.804288	1242.157504	1049.275904	763.811136	740.665344	1041.56064	709.804288	686.658496	2083.12128
	1056.991168	717.519552	1249.872768	1080.13696	771.5264	748.380608	1095.567488	717.519552	694.37376	3456.438272
	1064.706432	725.234816	1273.01856	1126.428544	779.241664	756.095872	1149.574336	725.234816	702.089024	3741.90304
	1118.71328	732.95008	1327.025408	1141.859072	786.956928	763.811136	1165.004864	732.95008	709.804288	3834.486208
	1126.428544	740.665344	1342.455936	1188.150656	794.672192	771.5264	1303.879616	740.665344	717.519552	3896.20832
	1165.004864	748.380608	1442.754368	1195.86592	802.387456	779.241664	1334.740672	748.380608	725.234816	
	1219.011712	771.5264	1543.0528	1249.872768	810.10272	786.956928	1350.1712	756.095872	732.95008	
	1303.879616	779.241664	1597.059648	1280.733824	817.817984	794.672192	1365.601728	763.811136	740.665344	
	1311.59488	786.956928	1627.920704	1311.59488	825.533248	802.387456	1404.178048	771.5264	748.380608	
	1319.310144	794.672192	1651.066496	1327.025408	833.248512	810.10272	1435.039104	779.241664	756.095872	
	1334.740672	802.387456	1689.642816	1342.455936	840.963776	817.817984	1442.754368	786.956928	763.811136	
	1342.455936	810.10272	1728.219136	1357.886464	848.67904	825.533248	1450.469632	794.672192	771.5264	
	1350.1712	817.817984	1735.9344	1373.316992	856.394304	833.248512	1465.90016	802.387456	779.241664	
	1365.601728	833.248512	2306.863936	1381.032256	864.109568	840.963776	1512.191744	810.10272	786.956928	
	1411.893312	840.963776	2360.870784	1404.178048	871.824832	864.109568	1535.337536	817.817984	794.672192	
	1450.469632	848.67904	2978.091904	1435.039104	879.540096	871.824832	1604.774912	894.970624	802.387456	
	1465.90016	856.394304	3240.41088	1481.330688	887.25536	879.540096	1635.635968	902.685888	810.10272	
	1558.483328	864.109568	3248.126144	1535.337536	894.970624	894.970624	1697.35808	910.401152	817.817984	
	1573.913856	871.824832	3255.841408	1581.62912	902.685888	902.685888	1728.219136	918.116416	825.533248	
	1597.059648	879.540096	3263.556672	1612.490176	910.401152	910.401152	1743.649664	925.83168	833.248512	
	1627.920704	887.25536	3363.855104	1620.20544	918.116416	918.116416	1766.795456	933.546944	840.963776	
	1658.78176	894.970624	3371.570368	1643.351232	925.83168	925.83168	1990.538112	941.262208	848.67904	
	1689.642816	902.685888	3464.153536	1689.642816	933.546944	933.546944	2098.551808	948.977472	856.394304	
	1728.219136	910.401152	3495.014592	1705.073344	941.262208	941.262208	2106.267072	956.692736	864.109568	
	1867.093888	918.116416	3502.729856	1735.9344	948.977472	948.977472	2322.294464	964.408	871.824832	
	2360.870784	925.83168	3556.736704	1743.649664	956.692736	956.692736	2345.440256	972.123264	879.540096	
	2654.050816	933.546944	3587.59776	1797.656512	964.408	964.408	2360.870784	979.838528	887.25536	
	2924.085056	941.262208	3657.035136	2198.85024	972.123264	972.123264	2468.88448	987.553792	894.970624	
	3178.688768	956.692736	3903.923584	2368.586048	979.838528	979.838528	2476.599744	995.269056	910.401152	
	3363.855104	964.408	3996.506752	2376.301312	987.553792	987.553792	2515.176064	1002.98432	918.116416	
	3448.723008	972.123264		2561.467648	995.269056	995.269056	2978.091904	1010.699584	925.83168	
	3587.59776	979.838528		2916.369792	1002.98432	1110.998016	3163.25824	1018.414848	933.546944	
	3664.7504	1002.98432		2970.37664	1010.699584	1118.71328	3240.41088	1033.845376	941.262208	
	3718.757248	1010.699584		2978.091904	1018.414848	1350.1712	3248.126144	1087.852224	948.977472	
	3749.618304	1018.414848		3201.83456	1033.845376	1357.886464	3417.861952	1095.567488	956.692736	
	3873.062528	1033.845376		3209.549824	1041.56064	1365.601728	3456.438272	1103.282752	964.408	
	3880.777792	1041.56064		3348.424576	1049.275904	1373.316992	3518.160384	1110.998016	972.123264	
		1049.275904		3448.723008	1056.991168	1381.032256	3556.736704	1118.71328	979.838528	
		1056.991168		3495.014592	1064.706432	1388.74752	3564.451968	1126.428544	987.553792	
		1064.706432		3541.306176	1072.421696	1396.462784	3749.618304	1134.143808	995.269056	
		1072.421696		3649.319872	1080.13696	1404.178048	3757.333568	1141.859072	1010.699584	
		1080.13696		3664.7504	1087.852224	1411.893312	3842.201472	1149.574336	1018.414848	
		1087.852224		3703.32672	1095.567488	1419.608576	3857.632	1157.2896	1026.130112	
		1095.567488		3749.618304	1103.282752	1427.32384	3888.493056	1165.004864	1033.845376	
		1103.282752		3803.625152	1110.998016	1435.039104		1172.720128	1041.56064	
		1110.998016		3996.506752	1118.71328	1442.754368		1180.435392	1049.275904	

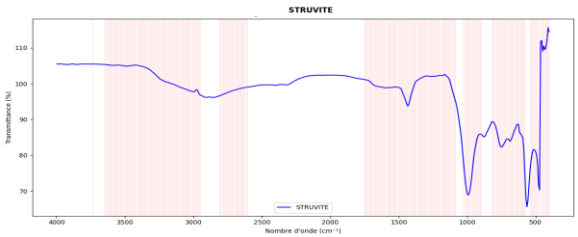
ANNEXE 18: Profils spectres avec variables sélectionnées avec les meilleurs modèles pour chaque composé

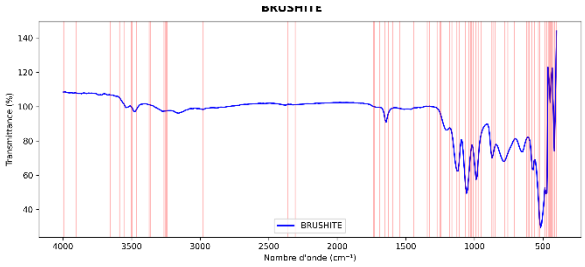


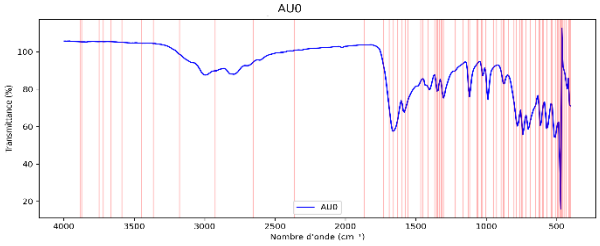


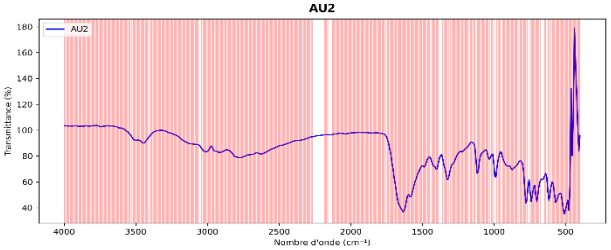


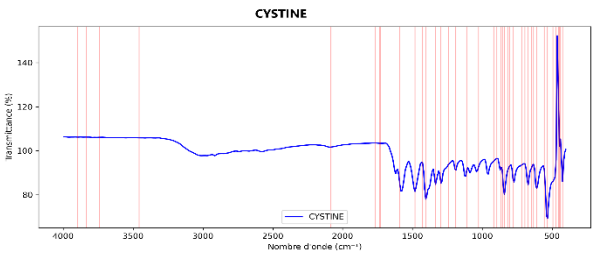


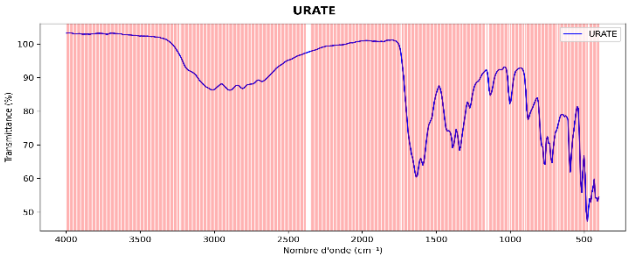


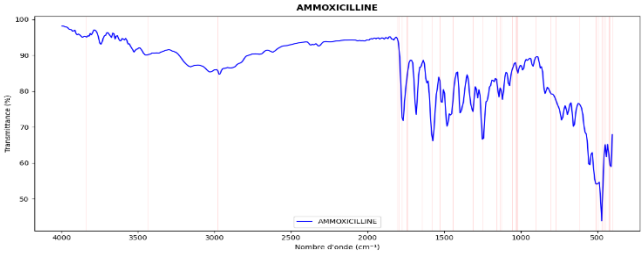












ANNEXE 19 : Prédictions en utilisant les meilleurs modèles

Nom échantillon	C1	C2	CALCITE	AU0	AU2	URATE	ARBAPATTI	STRUVIT	3RUSHITE	CYSTINE	MOXICILLIN	Prédiction (Composés majoritaires)	identification initiale (Composés majoritaires)
Modèle	Lasso_SVR	RF_Ridge	RF_Ridge	Lasso_SVR	RF_Ridge	RF_Ridge	Lasso_SVR	RF_Ridge	Lasso_SVR	Lasso_SVR	Lasso_SVR		
Patient 1 - Couche Externe - Zone 1	0	0	0	61,95214	37,552536	10,22143632	3,622074	0	0	0,0207028	0	**AU0 - AU2** - URATE	AU0 - AU2
Patient 1 - Section - Couche interne	15,05762	40,84511	0	51,621034	0	5,558544065	8,2738636	0	4,07474	0,1810563	3,2425339	**AU0** - C2 - C1	AU0
Patient 2 - Couche Externe - ZONE 1	0	0	2,734295	2,5903564	0	0	76,064783	0	31,8826	3,7107846	0,72123388	CARBAPATITE - BRUSHITE	CARB - BRUSH
Patient 3 - Couche Externe - Zone 2	0	100	0	0	0	0,012879498	5,3533988	0	0,35225	0,0026195	0,0635164	C2	C2
Patient 3 - Couche Externe - Zone 1	79,57099	24,51633	0	0	0	0	0,6390696	0	0	0	0,00443637	C1 - C2	C1 - C2
Patient 4 - Couche Externe - Zone 2	5,181628	77,61801	0,047192	0	0,602530005	0	18,157632	0,48879	0,02348	0	0	C2 - CARBAPATITE	C2 - CARB
Patient 4 - Couche Externe - Zone 1	3,803674	96,72913	0,034321	0	0	0	0	0	1,1901	0	0	C2	C2
Patient 5 - Section - Couche profonde 2	0	55,65369	0	0,0311836	0	0,018234662	48,007127	0	0	0	0,04777642	C2 - CARBAPATITE	C2 - CARB
Patient 5 - Section - Couche profonde 1	58,34658	34,83276	0	0,4563662	2,190214696	0,039413924	8,8091544	0	0	0,0267095	0	C1 - C2	C1 - C2
Patient 5 - Section - Couche interne	64,56241	0	0,517365	2,2444425	0	12,16077841	15,570641	0,58515	4,19364	0,2947867	0,22514259	**C1 - CARBAPATITE** - URATE	C1-CARB-URATE
Patient 5 - Couche Externe - zone 3	45,58426	30,76358	0,432062	0	0,210112468	4,009363557	0,3794959	3,25628	3,02015	0,1905831	0,04882786	C1 - C2	C1 - C2
Patient 5 - Couche Externe - Zone 2	5,361503	53,06367	0	0,6916684	2,05274576	1,642351055	8,8251093	3,10588	3,37175	0,1454346	0	C2	C2 - CARB - C1
Patient 5 - Couche Externe - Zone 1	3,129312	100	0,053215	0	0	0	0	0	1,33709	0	0	C2	C2
Patient 5 - Noyau -	3,284697	0	0	0	6,138425108	0	88,482051	0	0	0,4716245	0,13507009	CARBAPATITE	CARB
Patient 6 - Couche Externe - Zone 2	83,15417	21,04033	0,265515	0,7404536	5,062640641	4,5293597	0	5,33045	0,25684	0	0,03617715	C1 - C2	C1 - C2
Patient 6 - Couche Externe - Zone 1	2,741286	100	0	0	0	0	0	0	1,25361	0	0	C2	C2
Patient 7 - Couche Externe - Zone 2	45,75723	34,45644	0,308023	2,3728221	0	2,676354827	1,2754325	0,11204	2,09192	0	0,08128058	C1 - C2	C1 - C2
Patient 7 - Section - Couche interne	100	0	0	0	1,575108297	6,123045705	0	6,35948	0,52353	0,038728	0	C1	C1
Patient 7 - Couche Externe - Zone 1	0	100	0	0	0	0	1,061255	0	0,72953	0	0	C2	C2
Patient 8 - Couche Externe - Zone 1	11,31364	0	0,538613	6,833405	10,37960237	19,30200243	32,948969	17,0553	7,12467	1,8751632	1,35816711	**CARBAPATITE - URATE** - STRUVIT - C	CARB - URATE - C1
Patient 8 - Section - Couche interne	14,71924	6,410362	0	4,0307028	0	0	33,788439	0	10,3481	1,3768976	1,93868122	**CARBAPATITE - C1** - BRUSHITE	CARB - C1
Patient 9 - Section - Couche interne	10,60117	0	2,338102	6,7930544	17,03361345	48,50281366	43,873382	15,8957	3,62191	1,6583516	1,27757392	**URATE - CARBAPATITE** - AU2 - STRUV	URATE - CARB - C1
Patient 9 - Noyau -	12,11127	0	2,401756	3,1894511	23,18796157	54,33712238	24,562334	31,1318	9,10376	2,3903626	2,36744393	**URATE** - STRUVIT - **CARBAPATITE** - AU	URATE -CARB - C1
Patient 9 - Couche Externe - Zone 1	10,58571	1,310376	0,572049	5,2380014	10,47701619	19,9015123	44,381596	15,7132	4,4622	1,4232971	1,46600238	**CARBAPATITE - URATE** - STRUVIT - C	CARB - URATE - C1
Patient 10 - Section - Couche profonde 1	36,80618	1,08519	0,000408	0,8923402	0,253668344	23,88361226	33,878466	0	0	0	0	C1 - **CARBAPATITE - URATE**	CARB - URATE
Patient 10 - Section - Couche interne	14,52493	10,86685	0	5,5517431	0	0	29,016841	0	10,628	1,7177093	2,17110427	**CARBAPATITE - C1 - C2** - BRUSHITE	CAR -URATE -C1 -C2
Patient 10 - Couche Externe - Zone 2	10,38417	1,265487	0,51793	6,1192173	10,50240461	19,27345587	37,757506	16,0301	5,96343	1,6826075	1,73296243	**CARBAPATITE - URATE** - STRUVIT - C	CAR -URATE -C1
Patient 10 - Couche Externe - Zone 1	11,87972	18,56396	0	0,3983873	0	23,87163855	51,977	1,68955	8,93255	0	1,03081727	CARBAPATITE - URATE - C2 - C1	CAR -URATE -C1 -C2
Patient 10 - Noyau - Couche profonde 1	12,88851	20,23689	0	2,0663985	0	22,9820442	46,098608	0	9,53393	0,1619471	1,27833979	**CARBAPATITE - URATE** - C2 - C1	CARB - URATE
Patient 11 - Section - Couche profonde 1	96,55143	0	0,108704	0	0	5,321094257	12,400085	3,95122	0	0,1814709	0	C1 - CARBAPATITE	C1- CARB
Patient 11 - Section - Couche interne	36,94546	2,239383	0	0,986203	0,146391243	23,23755861	35,06045	0	0	0	0	C1 - CARBAPATITE - URATE	C1 - CARB -URATE
Patient 11 - Noyau - Couche profonde 1	98,36154	0	0,25233	0	2,457650514	19,36024486	3,9158727	5,45836	0,37023	0,1854158	0,01128457	**C1** - URATE	C1 -URATE
Patient 11 - Couche Externe - Zone 1	7,206391	3,621717	0	1,566309	0	8,530725648	14,631294	10,4195	0,32605	0	0	**CARBAPATITE** - STRUVIT	CARB - URATE
Patient 12 - Section - Couche interne	34,7502	0	0,053064	0,2555708	0,357558602	31,18528817	33,254426	0	0	0	0	C1 - CARBAPATITE - URATE	C1 -CARB -URATE
Patient 12 - Couche Externe - Zone 1	34,24693	0	0,020073	0,1283908	0	31,14210022	33,158589	0	0	0	0	C1 - CARBAPATITE - URATE	C1 -CARB - URATE
Patient 13 - Couche Externe - Zone 1	0	82,03273	0	0	0	0	5,2907243	2,30765	1,05228	0	0,21343831	C2	c2
Patient 14 - Couche Externe - Zone 1	100	12,59251	0,417365	0	0	4,133084369	0	6,55604	0	0,0033633	0,03163524	**C1** - C2	C1
Patient 14 - Noyau -	26,16186	0	0,131272	13,846346	54,43667656	0	1,3587343	0,3427	3,32808	0	0,33519352	AU2 - C1 - AU0	AU2 - C1 - AU0
Patient 14 - Section - Couche interne	68,38725	0	0,104884	3,3037281	11,02853816	0	10,330046	0,23702	3,08215	1,5337871	0	**C1 - AU2** - CARBAPATITE	C1 - AU2
Patient 15 - Couche Externe - Zone 1	73,62083	20,34	0	0	8,453471184	0	1,4539534	0	0	0,0321573	0	C1 - C2	C1 - C2
Patient 30 - Couche Externe - Zone 1	72,32384	3,286833	0	0	6,804634085	2,149444007	12,406393	2,4183	2,04584	0,472894	0	C1 - CARBAPATITE	C1-CARB
Patient 31 - Noyau -	32,36083	34,68638	0	0	1,089756009	0,85396395	13,750362	1,48473	0,46765	0,1465774	0	C2 - C1 - CARBAPATITE	C2 -C1-CARB
Patient 31 - Couche Externe - Zone 1	0	85,011	0	0	0	0	9,1335117	0,98726	0,54432	0	0,24495814	C2	C2
Patient 31 - Section - Couche interne	21,39517	44,54852	0	0	2,044883671	4,743123802	16,580624	2,44714	0,79191	0	0,04060107	C2 - C1 - CARBAPATITE	C2 -C1-CARB
Patient 32 - Section - Couche interne	81,72352	21,51445	0,233994	0,7970727	4,387143388	3,772311247	0	5,58585	0,36968	0	0,0357835	**C1** - C2	C1- C2
Patient 32 - Noyau -	100	15,17823	0,424306	0	0	4,326423643	0	7,08742	0	0,0598181	0,01421879	**C1** - C2	C1- C2
Patient 32 - Couche Externe - Zone 1	85,41876	21,47077	0,218394	0,3991592	5,255491021	4,678233907	0	4,97828	0,22351	0	0,04611644	**C1** - C2	C1- C2
Patient 33 - Section - Couche interne	100	7,371067	0,362611	0	0	2,241404383	0,0296739	0	0,1428	0,2209084	0,12051128	C1	C1
Patient 33 - Couche Externe - Zone 1	100	6,523349	0,367617	0	0	1,91703192	0,1444317	0	0,15947	0,2156496	0,1127068	C1	C1
Patient 34 - Couche Externe - Zone 1	0	0	0	0,0308203	0,448721395	3,733130387	82,788477	31,8909	0	0,1415697	0,00719697	**CARBAPATITE** - STRUVIT	CARB - STR
Patient 34 - Noyau -	0	35,35735	1,562601	2,3084784	0,419357271	0	10,832525	100	5,53957	0	0,24644216	**STRUVIT - C2** - CARBAPATITE	STR-C2-CARB
Patient 34 - Section - Couche interne	0	18,61098	0	0	0	0	0	81,1218	0,0644	0,022008	0	STRUVIT - C2	STRU - C2
Patient 35 - Couche Externe - Zone 1	79,06493	21,95392	0,096594	1,6171857	2,626862809	5,315273834	0,4810506	2,21697	0	0	0,034152	**C1** - C2	C1
Patient 36 - Couche Externe - Zone 1	13,94348	0,13359	0	42,525216	0	0	21,433815	0	4,0505	1,2220338	0,75423045	**AU0** - CARBAPATITE - C1	AU0 -CARB -C1
Patient 37 - Couche Externe - Zone 1	79,58663	21,93554	0,077575	1,6346602	2,254350157	4,88567035	0,5861373	1,74403	0	0	0,03121491	**C1** - C2	C1 - C2
Patient 37 - Noyau -	79,16724	22,29068	0,063397	1,5964281	1,939046976	4,370339158	0,5395017	2,44191	0	0	0,03633949	**C1** - C2	C1 -C2
Patient 37 - Section - Couche interne	79,2394	21,36161	0,087809	1,4545015	2,531007363	4,598587825	0,9268665	2,31976	0	0	0,02468063	**C1** - C2	C1 -C2
Patient 38 - Section - Couche interne	8,011322	0	0	0	6,311847715	0	80,984435	0	0	0,6465561	0,0552035	CARBAPATITE	CARB
Patient 38 - Noyau -	17,58037	0	0,143509	0	11,24948684	3,011417028	69,338364	0	1,58581	0	0,18634664	**CARBAPATITE - C1** - AU2	CARB -C1
Patient 38 - Couche Externe - Zone 2	4,693607	0	0	2,6127077	4,22187103	0	80,805288	18,0678	1,65817	0,7922276	0,24381144	**CARBAPATITE** - STRUVIT	CARB -STR
Patient 38 - Couche Externe - Zone 1	0	0	0	1,3963834	12,1329246	0	78,751311	4,35724	0	0	0,11476607	**CARBAPATITE** - AU2	CARB
Patient 39 - Couche Externe - Zone 1	100	14,82569	0,419628	0	0	4,537381877	0,4683244	6,3631	0	0,0585269	0,02741719	**C1** - C2	C1
Patient 39 - Section - Couche interne	100	13,00518	0,397351	0	0	3,941045524	0,1212186	6,33712	0	0,0251831	0,03360478	**C1** - C2	C1
Patient 40 - Couche Externe - Zone 1	0,396855	0	0	62,223336	0	3,332907883	11,436685	8,28762	1,70391	0,107313	2,51662112	AU0 - CARBAPATITE	AU0 - CARB
Patient 40 - Section - Couche interne	5,755109	0,086723	0	54,668479	3,195037336	12,12547884	3,1181302	7,33294	0	0	0	AU0 - URATE	AU0 - URATE
Patient 41 - Couche Externe - Zone 1	7,775872	7,31896	0	44,705842	0	0	26,481215	0	3,19374	1,1476228	0,6752372	AU0 - CARBAPATITE	AU0
Patient 41 - Noyau -	11,39734	3,703043	0	44,021362	0	0	24,416621	0	3,46807	1,1572966	0,6953745	AU0 - CARBAPATITE - C1	AU0 -CARB -C1
Patient 41 - Section - Couche interne	7,595007	3,771986	0	45,700159	0	0	27,11773	0	3,17265	1,1231858	0,68673599	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 42 - Couche Externe - Zone 1	79,13917	22,44537	0,046217	1,6545632	2,272612155	4,435007618	0,0532314	2,23975	0	0,0132026	0,04257502	C1 - C2	C1- C2
Patient 42 - Noyau -	79,32515	20,66665	0,027103	1,6979332	2,540119935	4,138647878	0,1545264	2,05152	0	0,0247961	0,04452832	C1 - C2	C1
Patient 42 - Section - Couche interne	79,87402	21,86523	0,023508	1,5600061	2,031902551	4,829252341	0,2667539	2,03397	0	0,0346942	0,04204151	C1 - C2	C1
Patient 43 - Noyau -	34,95843	21,24838	0,202605	0	5,242435974	2,405824226	0	5,28116	0	0,0450818	0,0350253	C1 - C2	C1
Patient 43 - Couche Externe - Zone 1	3,694297	100	0	0	0	0	1,7044538	0	1,7223	0	0,02011862	C2	C2
Patient 43 - Section - Couche interne	36,20335	21,15945	0,285136	0	5,134046902	2,250190259	0	5,18018	0	0,0150566	0,04272946	C1 - C2	C1
Patient 30 - Couche Externe - Zone 1	72,32384	3,286833	0	0	6,804634085	2,149444007	12,406393	2,4183	2,04584	0,472894	0	C1 - CARBAPATITE	C1-CARB
Patient 31 - Noyau -	32,36083	34,68638	0	0	1,089756009	0,85396395	13,750362	1,48473	0,46765	0,1465774	0	C2 - C1 - CARBAPATITE	C2 -C1-CARB
Patient 31 - Couche Externe - Zone 1	0	85,011	0	0	0	0	9,1335117	0,98726	0,54432	0	0,24495814	C2	C2
Patient 31 - Section - Couche interne	21,39517	44,54852	0	0	2,044883671	4,743123802	16,580624	2,44714	0,79191	0	0,04060107	C2 - C1 - CARBAPATITE	C2 -C1-CARB
Patient 32 - Section - Couche interne	81,72352	21,51445	0,233994	0,7970727	4,387143388	3,772311247	0	5,58585	0,36968	0	0,0357835	**C1** - C2	C1- C2
Patient 32 - Noyau -	100	15,17823	0,424306	0	0	4,326423643	0	7,08742	0	0,0598181	0,01421879	**C1** - C2	C1- C2
Patient 32 - Couche Externe - Zone 1	85,41876	21,47077	0,218394	0,3991592	5,255491021	4,678233907	0	4,97828	0,22351	0	0,04611644	**C1** - C2	C1- C2
Patient 33 - Section - Couche interne	100	7,371067	0,362611	0	0	2,241404383	0,0296739	0	0,1428	0,2209084	0,12051128	C1	C1
Patient 33 - Couche Externe - Zone 1	100	6,523349	0,367617	0	0	1,91703192	0,1444317	0	0,15947	0,2156496	0,1127068	C1	C1
Patient 34 - Couche Externe - Zone 1	0	0	0	0,0308203	0,448721395	3,733130387	82,788477	31,8909	0	0,1415697	0,00719697	**CARBAPATITE** - STRUVIT	CARB - STR
Patient 34 - Noyau -	0	35,35735	1,562601	2,3084784	0,419357271	0	10,832525	100	5,53957	0	0,24644216	**STRUVIT - C2** - CARBAPATITE	STR-C2-CARB
Patient 34 - Section - Couche interne	0	18,61098	0	0	0	0	0	81,1218	0,0644	0,022008	0	STRUVIT - C2	STRU - C2
Patient 35 - Couche Externe - Zone 1	79,06493	21,95392	0,096594	1,6171857	2,626862809	5,315273834	0,4810506	2,21697	0	0	0,034152	**C1** - C2	C1
Patient 36 - Couche Externe - Zone 1	13,94348	0,13359	0	42,525216	0	0	21,433815	0	4,0505	1,2220338	0,75423045	**AU0** - CARBAPATITE - C1	AU0 -CARB -C1
Patient 37 - Couche Externe - Zone 1	79,58663	21,93554	0,077575	1,6346602	2,254350157	4,88567035	0,5861373	1,74403	0	0	0,03121491	**C1** - C2	C1 - C2
Patient 37 - Noyau -	79,16724	22,29068	0,063397	1,5964281	1,939046976	4,370339158	0,5395017	2,44191	0	0	0,03633949	**C1** - C2	C1 -C2
Patient 37 - Section - Couche interne	79,2394	21,36161	0,087809	1,4545015	2,531007363	4,598587825	0,9268665	2,31976	0	0	0,02468063	**C1** - C2	C1 -C2
Patient 38 - Section - Couche interne	8,011322	0	0	0	6,311847715	0	80,984435	0	0	0,6465561	0,0552035	CARBAPATITE	CARB
Patient 38 - Noyau -	17,58037	0	0,143509	0	11,24948684	3,011417028	69,338364	0	1,58581	0	0,18634664	**CARBAPATITE - C1** - AU2	CARB -C1
Patient 38 - Couche Externe - Zone 2	4,693607	0	0	2,6127077	4,22187103	0	80,805288	18,0678	1,65817	0,7922276	0,24381144	**CARBAPATITE** - STRUVIT	CARB -STR
Patient 38 - Couche Externe - Zone 1	0	0	0	1,3963834	12,1329246	0	78,751311	4,35724	0	0	0,11476607	**CARBAPATITE** - AU2	CARB
Patient 39 - Couche Externe - Zone 1	100	14,82569	0,419628	0	0	4,537381877	0,4683244	6,3631	0	0,0585269	0,02741719	**C1** - C2	C1
Patient 39 - Section - Couche interne	100	13,00518	0,397351	0	0	3,941045524	0,1212186	6,33712	0	0,0251831	0,03360478	**C1** - C2	C1
Patient 40 - Couche Externe - Zone 1	0,396855	0	0	62,223336	0	3,332907883	11,436685	8,28762	1,70391	0,107313	2,51662112	AU0 - CARBAPATITE	AU0 - CARB
Patient 40 - Section - Couche interne	5,755109	0,086723	0	54,668479	3,195037336	12,12547884	3,1181302	7,33294	0	0	0	AU0 - URATE	AU0 - URATE
Patient 41 - Couche Externe - Zone 1	7,775872	7,31896	0	44,705842	0	0	26,481215	0	3,19374	1,1476228	0,6752372	AU0 - CARBAPATITE	AU0
Patient 41 - Noyau -	11,39734	3,703043	0	44,021362	0	0	24,416621	0	3,46807	1,1572966	0,6953745	AU0 - CARBAPATITE - C1	AU0 -CARB -C1
Patient 41 - Section - Couche interne	7,595007	3,771986	0	45,700159	0	0	27,11773	0	3,17265	1,1231858	0,68673599	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 42 - Couche Externe - Zone 1	79,13917	22,44537	0,046217	1,6545632	2,272612155	4,435007618	0,0532314	2,23975	0	0,0132026	0,04257502	C1 - C2	C1- C2
Patient 42 - Noyau -	79,32515	20,66665	0,027103	1,6979332	2,540119935	4,138647878	0,1545264	2,05152	0	0,0247961	0,04452832	C1 - C2	C1
Patient 42 - Section - Couche interne	79,87402	21,86523	0,023508	1,5600061	2,031902551	4,829252341	0,2667539	2,03397	0	0,0346942	0,04204151	C1 - C2	C1
Patient 43 - Noyau -	34,95843	21,24838	0,202605	0	5,242435974	2,405824226	0	5,28116	0	0,0450818	0,0350253	C1 - C2	C1
Patient 43 - Couche Externe - Zone 1	3,694297	100	0	0	0	0	1,7044538	0	1,7223	0	0,02011862	C2	C2
Patient 43 - Section - Couche interne	36,20335	21,15945	0,285136	0	5,134046902	2,250190259	0	5,18018	0	0,0150566	0,04272946	C1 - C2	C1
Patient 44 - Couche Externe - Zone 1	15,32324	30,76277	0	51,484711	0	4,701192618	7,882004	0	4,04006	0,1570917	3,64572026	AU0 - C2 - C1	AU0- C2 -C1
Patient 44 - Noyau -	16,01802	22,258	0	85,212195	8,14432861	4,133360466	0	0	1,09171	0,1520663	0	AU0 - C2 - C1	AU0- C2 -C1
Patient 44 - Section - Couche interne	11,16095	8,213918	0	38,432436	13,08883332	2,080905676	1,2778274	0	2,65336	0	0,03121039	AU0 - AU2 - C1	AU0 - AU2 -C1
Patient 45 - Couche Externe - Zone 2	57,52328	34,50901	0,196685	0	1,878617717	0	0,8638421	3,12869	0,11592	0,0010221	0,02200613	C1 - C2	C1- C2
Patient 45 - Couche Externe - Zone 3	76,4405	0	0	1,297339	0,675057455	2,433703032	12,760387	2,16932	1,80922	0,7206097	0	C1 - CARBAPATITE	C1 -CARB
Patient 45 - Noyau -	86,02696	0	0	0	2,045888438	1,432241433	5,0019186	5,80301	1,24825	0,2130656	0,03792506	C1	C1
Patient 45 - Section - Couche interne	84,67514	0	0	0	0,985886532	2,097258195	6,946028	5,09293	0,98935	0,2518863	0,0128226	C1	C1
Patient 45 - Couche Externe - Zone 1	0	83,01074	0	0	0	0	8,7025644	1,85362	0,65087	0	0,25076653	C2	C2
Patient 46 - Couche Externe - Zone 1	87,8071	17,33168	0,253092	0	2,271137568	3,226747668	0	4,01106	0	0	0,05383453	C1 - C2	C1
Patient 46 - Noyau -	87,00033	17,54475	0,263078	0	2,824404469	3,502768489	0	3,81937	0	0,0056232	0,05151339	C1 - C2	C1
Patient 46 - Section - Couche interne	87,22757	18,82838	0,239858	0	2,437276525	3,42464143	0	3,79719	0	0	0,0538361	C1 - C2	C1
Patient 47 - Couche Externe - Zone 1	84,31142	20,2632	0,229699	0,1947343	5,823681186	3,707213746	0	5,98308	0,36098	0	0,04209531	C1 - C2	C1
Patient 48 - Section - Couche interne	11,31677	13,26237	0,865557	75,338037	5,045074023	0	0	13,0014	1,14387	0,2243087	0,09547296	AU0 - C2 - STRUVIT - C1	AU0
Patient 48 - Noyau -	8,704336	1,666323	0	44,839732	0	0	25,843874	0	3,18753	1,1376502	0,68062786	AU0 - CARBAPATITE	AU0
Patient 48 - Couche Externe - Zone 1	10,73953	9,714209	0,476303	77,257345	6,215758053	0	0	10,1132	1,07871	0,26546	0,20628509	**AU0 - C1** - STRUVIT	AU0- C1
Patient 49 - Couche Externe - Zone 1	100	0	0	0	2,496656042	6,363162211	0	6,22841	0,64406	0,0614576	0	C1	C1
Patient 49 - Section - Couche interne	100	0	0	0	2,091283833	7,220381013	0	7,47315	0,55144	0,0679473	0	C1	C1
Patient 50 - Couche Externe - Zone 1	84,24392	8,548413	0,114475	0,9284733	2,353950169	0	0	0,45545	0	0,1130156	0,0704636	C1	C1
Patient 51 - Section - Couche interne	43,87716	14,73543	0	0	8,500279339	0,465612204	34,463542	0,14832	1,40095	0,006285	0	C1 - CARBAPATITE - C2	C1- CARB
Patient 51 - Couche Externe - Zone 2	13,01158	45,00067	0	0	7,752006501	0	0	0	0,06386	0,0322643	0,13836531	C2 - C1	C2 -C1
Patient 51 - Noyau -	39,06518	22,40596	0,103675	1,7282495	3,241126332	1,0484327	0	5,56756	0	0,1351347	0,08194157	C1 - C2	C1
Patient 51 - Couche Externe - Zone 1	0	84,98936	0	0	0	0	7,5796711	1,75352	0,55685	0	0,22540362	C2	C2

ANNEXE 19. Prédictions en utilisant les meilleurs modèles (suite)

Patient 52 - Couche Externe - Zone 1	83,93321	9,977393	0,084228	1,0300045	2,562039808	0	0	0,66074	0	0,1171196	0,0711958	C1	C1
Patient 53 - Couche Externe - Zone 1	70,53756	0	0,187051	1,156123	1,055563832	4,213190846	24,337733	6,64503	0,73522	0,2257764	0,02843923	C1 - CARBAPATITE	C1- CARB
Patient 53 - Section - Couche interne	63,59381	0	0,161379	1,7006433	2,39160472	3,380778525	26,697525	7,0198	0,65075	0,5084468	0,05919488	C1 - CARBAPATITE	C1- CARB
Patient 54 - Section - Couche interne	11,94695	7,321394	0	37,244287	12,49183209	1,903000494	6,1963825	0,08255	2,51645	0	0,05725373	AU0 - AU2 - C1	AU0- AU2-C1
Patient 54 - Couche Externe - Zone 1	7,72312	3,903409	0	45,473907	0	0	26,312732	0	3,18205	1,1295039	0,68140848	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 54 - Noyau -	8,675405	5,547349	0	44,464232	0	0	25,870457	0	3,26184	1,159559	0,67438444	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 55 - Couche Externe - Zone 1	83,02262	10,67211	0,076901	1,1468238	2,411528372	0	0	0,70122	0	0,1310885	0,06783852	C1 - C2	C1
Patient 56 - Couche Externe - Zone 1	11,94695	7,321394	0	37,244287	12,49183209	1,903000494	6,1963825	0,08255	2,51645	0	0,05725373	AU0 - AU2 - C1	AU0 -AU2 -C1
Patient 57 - Section - Couche interne	0	0	0	0,5341588	97,52360386	2,326846339	0	0	0	0	0	AU2	AU2
Patient 57 - Couche Externe - Zone 1	7,775872	7,91836	0	44,705842	0	0	26,481215	0	3,19374	1,1476228	0,6752372	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 58 - Couche Externe - Zone 1	0	2,521304	0	1,3606932	100	0,020552975	0	0	0	0	0	AU2	AU2
Patient 58 - Section - Couche interne	0	0	0	0	95,50572254	0	0	0	0	0	0	AU2	AU2
Patient 59 - Section - Couche interne	100	3,040809	0,287299	0	0	1,62138978	0,0916259	0,73584	0,18464	0,2127402	0,10343272	C1	C1
Patient 59 - Couche Externe - Zone 1	0	85,39179	0	0	0	0	8,881503	1,81549	0,44783	0,0040369	0,2498373	C2	C2
Patient 59 - Noyau -	100	8,023419	0,339363	0	0	2,453883407	0	0,30518	0,18403	0,2153289	0,10530952	C1	C1
Patient 60 - Couche Externe - Zone 1	83,14628	0	0,500844	4,6778149	4,769306025	12,53203525	0,006441	2,84468	0,46358	0,0234603	0,11313421	C1 - URATE	C1 -URATE
Patient 61 - Section - Couche interne	84,83061	10,18372	0,078488	0,9503121	2,651517893	0	0	0,10707	0	0,1347717	0,07164828	C1 - C2	C1
Patient 61 - Noyau -	83,93135	9,523162	0,093901	1,1120663	2,729063173	0	0	1,043398	0	0,1184632	0,07351718	C1	C1
Patient 61 - Couche Externe - Zone 1	84,23285	8,392589	0,069472	1,0938963	2,137786734	0,036656109	0	0,65298	0	0,1218123	0,06156077	C1	C1
Patient 62 - Couche Externe - Zone 1	2,494061	30,00464	0	0	0	0	77,781745	21,215	0	0,1550556	0,19741965	CARBAPATITE - C2 - STRUVIT	CARB - WITLOKITE -C2
Patient 62 - Section - Couche interne	2,430206	32,73945	0	0	0	0	82,160341	21,674	0	0	0,14854615	CARBAPATITE - C2 - STRUVIT	CARB - WITLOKITE - C2
Patient 63 - Couche Externe - Zone 1	0	100	0	0	0	0,664223303	3,460361	0	0,2917	0	0,0682695	C2	C2
Patient 64 - Noyau -	7,775872	7,91836	0	44,705842	0	0	26,481215	0	3,19374	1,1476228	0,6752372	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 64 - Couche Externe - Zone 1	0	0	0	61,667603	40,15707168	8,9383851	2,9770129	0	0	0	0	AU0 - AU2	AU2- AU0
Patient 64 - Section - Couche interne	11,18095	8,213918	0	36,432436	13,08883332	2,080905676	7,2778274	0	2,65336	0	0,09121039	AU0 - AU2 - C1	AU0 -AU2 -C1
Patient 65 - Couche Externe - Zone 1	7,325634	2,451626	0	44,80339	0	0	26,81826	0	3,24349	1,1437733	0,68017243	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 65 - Section - Couche interne	8,335017	0,093665	0	46,135081	0	0	25,381741	0	3,17673	1,1191507	0,70258285	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 66 - Couche Externe - Zone 1	8,544747	2,133058	0	45,417553	0	0	26,027346	0	3,18553	1,1317282	0,68859763	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 66 - Section - Couche interne	9,727393	5,357475	0	44,765335	0	0	25,070697	0	3,31965	1,1462151	0,68387567	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 67 - Couche Externe - Zone 1	87,63676	17,07201	0,223559	0	3,592139706	3,803963679	0	3,59725	0	0,0012636	0,05556835	C1 - C2	C1
Patient 68 - Couche Externe - Zone 1	0	100	0	0	0	0	4,5126425	0	0,31995	0,0104428	0,0568156	C2	C2
Patient 69 - Couche Externe - Zone 1	84,33359	36,4668	0	0,4021009	12,31592408	0	9,7196271	0	0,69499	0	0,02247758	C1 - C2 - AU2	C1 -C2 -AU2
Patient 70 - Couche Externe - Zone 1	7,961156	100	0,224689	1,7344423	1,946265195	0	9,584704	13,4867	2,2714	0,1397234	1,32519631	C2 - STRUVIT	C2 -STR
Patient 70 - Section - Couche interne	8,040417	88,65971	0,063012	2,8093753	4,085463828	0	21,423372	7,1743	1,43208	0	1,19444225	C2 - CARBAPATITE	C2 -CARB
Patient 71 - Section - Couche interne	7,362922	3,76248	0	45,165748	0	0	26,623534	0	3,17676	1,1435432	0,68220306	AU0 - CARBAPATITE	AU0
Patient 71 - Noyau -	11,39734	3,703043	0	44,021362	0	0	24,416621	0	3,46807	1,1572966	0,6953745	AU0 - CARBAPATITE - C1	AU0 -CARB -C1
Patient 71 - Couche Externe - Zone 1	14,80646	0	0	41,855087	0	0	21,913321	0	3,3682	1,2183265	0,7326517	AU0 - CARBAPATITE - C1	AU0 -CARB -C1
Patient 72 - Couche Externe - Zone 1	0,744253	19,36832	0	0	1,757153196	2,158342813	58,203515	1,52866	19,576	0,1246289	0	CARBAPATITE - C2 - BRUSHITE	CARB -C2 -BRUSH
Patient 73 - Couche Externe - Zone 1	100	10,88387	0,339349	0	0	3,135342731	0	7,2182	0	0,0499789	0	C1 - C2	C1
Patient 74 - Noyau -	0,054511	1,423805	0	0,1311294	0,042406371	97,42087365	0	0,91356	0,00325	0	0	URATE	URATE
Patient 74 - Section - Couche interne	0,203171	3,162759	0	0,2535317	1,503586597	96,2831601	0,1018442	1,39144	0,05459	0,0183374	0	URATE	URATE
Patient 74 - Couche Externe - Zone 1	9,856266	0	0,240425	76,105357	7,81312751	0	11,839318	6,50815	0,32477	0,1281901	0,33447011	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 75 - Couche Externe - Zone 1	98,36257	14,43643	0,206793	0	3,257146526	2,933256577	0	6,83883	0	0	0,04852912	C1 - C2	C1- C2
Patient 75 - Section - Couche interne	97,89702	22,24221	0,146153	1,7478433	2,508123653	0,874719254	0	5,30696	0	0,1556945	0,1000718	C1 - C2	C1- C2
Patient 75 - Noyau -	99,47501	15,15808	0,216114	0	2,963632031	3,43080012	0	7,32909	0	0	0,0509312	C1 - C2	C1- C2
Patient 76 - Couche Externe - Zone 1	86,53507	17,10739	0,244576	0	2,718846598	3,168445713	0	3,37944	0	0,015425	0,06192583	C1 - C2	C1- C2
Patient 77 - Couche Externe - Zone 1	0	30,07737	0	0	5,024111673	0	80,363549	4,52362	0	0,8333096	0,07735083	CARBAPATITE - C2	CARB -C2
Patient 77 - Noyau -	0	33,13108	0,394465	0	18,32817762	0	90,0707197	0	0	0,1432335	0,12742074	CARBAPATITE - C2 - AU2	CARB -C2
Patient 77 - Section - Couche interne	0	29,63495	0,0452	0	10,61886797	0	89,402723	6,81948	0	0,2005627	0,13650077	CARBAPATITE - C2 - AU2	CARB -C2
Patient 78 - Couche Externe - Zone 1	10,48162	34,36063	0	0	0	0,273782232	7,0678441	4,63495	0,14237	0,0618909	0,19663468	C2 - C1	C2 -C1
Patient 78 - Section - Couche interne	87,08737	0	0	2,3717877	4,737372991	2,336233188	3,387252	0	0	0,1868493	0,05351719	C1	C1
Patient 79 - Couche Externe - Zone 1	100	6,371043	0,353896	0	0	2,190721849	0,7551127	0	0,2392	0,2054945	0,13043963	C1	C1
Patient 80 - Couche Externe - Zone 1	28,76733	5,768619	0	5,8556638	2,360153181	0	22,253018	6,23935	3,79397	0	0,35436916	C1 - CARBAPATITE	C1 -CARB
Patient 81 - Couche Externe - Zone 1	77,33819	27,35766	0,181555	1,1732076	2,009303828	7,353766503	0,0276002	0,9393	0,26108	0	0,01517689	C1 - C2	C1
Patient 82 - Couche Externe - Zone 1	86,28641	6,574658	0,094696	0,6262127	2,642443984	0,039396672	0	1,19673	0	0,1000107	0,07374817	C1	C1
Patient 83 - Couche Externe - Zone 1	87,79546	0	0,733381	1,0632708	1,171118378	14,73866145	4,3544131	2,52618	2,01171	0,0141943	0,11176228	C1 - URATE	C1- URATE
Patient 83 - Section - Couche interne	100	0,016202	0,410438	5,2705603	3,263485177	12,48296748	0	0	0,44379	0,0908628	0,32085695	C1 - URATE	C1- URATE
Patient 83 - Noyau -	86,30668	0	0,493394	4,389432	4,775180493	11,85803938	0,1385456	2,57303	0,42178	0	0,07915638	C1 - URATE	C1- URATE
Patient 84 - Noyau -	99,3319	0	0,117563	0,2275475	0,093114136	0	0	1,13019	0	0,0020239	0	C1	C1
Patient 84 - Couche Externe - Zone 1	8,932717	95,36742	0	0	0	0,482369032	7,6352886	4,61955	0,03273	0,0925711	0,18213185	C2	C2
Patient 84 - Section - Couche interne	100	0	0	0	2,411056502	6,874764508	0	6,74725	0,51355	0,0497616	0	C1	C1
Patient 85 - Couche Externe - Zone 1	6,753042	79,75051	0,525375	0	0	0	13,640101	1,96789	0,77074	0,0743755	0,3678716	C2 - CARBAPATITE	C2 -CARB
Patient 85 - Section - Couche interne	84,51818	8,143297	0,125325	0,8153451	2,059475727	0	0	1,03306	0	0,0933119	0,07676906	C1	C1
Patient 86 - Couche Externe - Zone 1	0	27,02396	0	0	0,138918599	0	75,13275	2,29648	0	0,3466672	0,08421247	CARBAPATITE - C2	CARB -C2
Patient 86 - Section - Couche interne	0	52,2564	0,005886	0	21,62821263	0	88,909961	0	0	0,4607285	0,11487599	CARBAPATITE - C2 - AU2	CARB -C2
Patient 86 - Noyau -	0	49,35353	0,22396	0	19,23702374	0	88,808251	0	0	0,4300026	0,16271765	CARBAPATITE - C2 - AU2	CARB -C2
Patient 87 - Section - Couche profonde 1	0	0	1,514657	33,776214	11,90681106	0,95408223	12,101614	22,2753	6,13151	0,0481734	2,47463464	AU0 - STRUVIT - CARBAPATITE - AU2	AU0 - CARB -AU2
Patient 87 - Section - Couche interne	5,61088	0	1,857614	8,1127729	52,14373823	17,06474485	25,627956	22,3132	3,70756	2,3149374	2,32265631	AU2 - CARBAPATITE - STRUVIT - URATE	AU2- C1
Patient 87 - Noyau -	98,82678	0	0,120759	0,3395515	0,532754554	0	0	1,10542	0	0	0,01223943	C1	C1
Patient 87 - Couche Externe - Zone 2	0	0	2,936676	15,273026	0	0	22,361887	28,362	5,73473	1,1148596	2,54208563	STRUVIT - CARBAPATITE - AU0	CARB - AU0
Patient 87 - Couche Externe - Zone 1	10,51834	0	3,003565	9,1300426	0	0	24,712887	35,8762	10,2471	2,5091686	2,65142754	STRUVIT - CARBAPATITE - C1 - BRUSHITE	AU0 - CARB - C1
Patient 88 - Couche Externe - Zone 2	8,643696	92,59852	0,37176	0	2,916576265	0,020093328	1,7025679	2,0761	0	0	0,02631595	C2	C2
Patient 88 - Couche Externe - Zone 1	8,615683	77,17059	0,495469	0	0	0	13,426109	1,81155	0,74548	0,0845937	0,40340394	C2 - CARBAPATITE	C2 - CARB
Patient 88 - Section - Couche interne	5,270409	51,42722	0	0,3458396	0	0,048077735	4,3870018	2,32453	4,30288	0,0545515	0,06333289	C2	C2
Patient 88 - Noyau -	30,09471	5,432089	0,451288	1,7201122	0,662112273	0	13,577483	0,4414	4,68013	0,1940588	0,03921669	C1 - CARBAPATITE	C1 - CARB
Patient 89 - Section - Couche profonde 1	8,486028	0	0,432231	2,8734324	2,473233723	0	93,170173	5,18029	0	0	0,15358617	CARBAPATITE	CARB
Patient 89 - Section - Couche interne	0	0	0,019366	0	0	0	90,678297	0	0	1,7982242	0,06388878	CARBAPATITE	CARB
Patient 89 - Noyau -	6,481101	12,59136	0,363801	1,5786584	4,758072782	0	81,358314	0	0	0,3305081	0,18339766	CARBAPATITE - C2	CARB
Patient 89 - Couche Externe - Zone 1	0	6,010435	0	0	1,8207547	0	92,203331	0,51138	0	0,1164887	0,03764887	CARBAPATITE	CARB
Patient 89 - Couche Externe - Zone 2	40,66381	7,128014	0,054872	0,1674922	1,409696106	7,865275421	43,125802	0	0	1,0482602	0	CARBAPATITE - C1	CARB - C1
Patient 90 - Couche Externe - Zone 1	40,62401	19,17307	0,209629	0,0438437	3,35743858	0	40,231451	2,18887	3,46696	0,4777386	0,2514597	C1 - CARBAPATITE - C2	C1 - CARB - C2
Patient 91 - Couche Externe - Zone 2	3,153967	75,43754	0,046656	0	0	0	3,262422	3,83052	1,6638	0	0,08000351	C2	C2
Patient 91 - Section - Couche interne	16,3223	66,94113	0,40071	0	0,392812097	0,939536883	0,6423273	0	0	0,0537694	0	C2 - C1	C1 - C2
Patient 91 - Couche Externe - Zone 1	21,62108	63,20767	0,187036	0	0,858028606	0,318415681	0	1,76574	1,4741	0	0	C2 - C1	C2 - C1
Patient 92 - Couche Externe - Zone 3	95,447	0	0,51415	4,3606185	0	11,38110325	5,5413694	0	1,01732	0,1332524	0,05108218	C1 - URATE	C1 - URATE
Patient 92 - Couche Externe - Zone 1	11,39653	0	11,81703	9,8638894	0	100	17,077428	0	17,348	2,2109393	2,61906322	URATE - BRUSHITE - CARBAPATITE - CALCI	C1 - AU0 - CARB
Patient 92 - Section - Couche profonde 1	0	48,70685	0,898212	80,869845	46,32875362	0	0	0	1,01003	0,1071907	0	AU0 - C2 - AU2	AU0 - C2 - AU2
Patient 92 - Section - Couche interne	12,26221	0	0	10,062582	0	0	20,83118	100	11,1575	2,5002196	2,84503662	STRUVIT - CARBAPATITE - C1 - BRUSHITE - /	AU0 - C1 - AU2
Patient 92 - Couche Externe - Zone 2	0	53,35186	0,715037	81,428042	43,35098332	0	0	0	0,89224	0,0748564	0	AU0 - C2 - AU2	AU0 - C2 - AU2
Patient 92 - Noyau -	0	41,96823	0,453739	81,241915	36,064066	0	2,2288583	0	1,06093	0,2482581	0,10570744	AU0 - C2 - AU2	AU0 - C2 - AU2
Patient 93 - Section - Couche interne	0	36,41283	1,306118	1,3866317	0	2,687063698	8,1961631	100	5,31221	0	0,19539031	STRUVIT - C2	STRUVIT - C2
Patient 93 - Noyau -	0	39,87285	1,105288	1,5343756	0,651013284	4,06048871	3,4841474	100	5,48815	0	0,18737511	STRUVIT - C2	STRUVIT - C2
Patient 93 - Couche Externe - Zone 1	0,559037	0	0,013574	0,2419279	1,406135786	0	97,996125	0	0,22034	0	0	CARBAPATITE	CARB
Patient 94 - Section - Couche interne	98,81693	0	0,738185	0	1,965010791	14,30976914	2,1093917	0	0,36531	0,1453778	0,10022541	C1 - URATE	C1 - URATE
Patient 94 - Couche Externe - Zone 1	73,58423	3,885216	0,671176	1,1517362	1,87125118	14,09514664	0	28,5545	6,63368	0	0,04235264	C1 - STRUVIT - URATE	C1 - URATE
Patient 94 - Noyau -	100	0	0,261264	6,2766338	2,895297148	11,18651679	0	0	0,41276	0,0750219	0,32202492	C1 - URATE	C1 - URATE
Patient 95 - Section - Couche interne	62,94156	2,393945	0	2,4847797	6,760003972	3,873904354	18,586148	0	3,06311	0,0976708	0,33085127	C1 - CARBAPATITE	C1 - CARB
Patient 95 - Noyau -	63,74511	0	0	3,6855946	9,7933306	2,85545642	22,217018	1,71552	3,41324	0,0956545	0,39832983	C1 - CARBAPATITE	C1 - CARB
Patient 95 - Couche Externe - Zone 2	43,46307	45,24041	0	0,0312817	4,590390605	3,405228763	3,3372305	6,44553	1,34417	0,0552861	0,37364489	C1 - C2	C2 - C1
Patient 95 - Couche Externe - Zone 1	8,644666	36,50179	0	0	0	0,935312916	6,7162316	4,86704	0,37323	0,057706	0,15603267	C2	C2
Patient 96 - Couche Externe - Zone 1	0	44,27634	0	0	0,623735918	0	31,655643	0,04319	33,2438	0	0	C2 - BRUSHITE - CARBAPATITE	CARB - BRUSH - C2
Patient 97 - Couche Externe - Zone 1	1,640035	100	0	0	0	0	0	0	1,23988	0	0	C2	C2
Patient 98 - Section - Couche interne	55,14746	0	0	2,7773507	5,935282505	2,93153867	37,642661	0	4,17595	0,584714	0,19117756	C1 - CARBAPATITE	C1 - CARB
Patient 98 - Noyau -	56,2888	0	0	4,8035029	7,535648533	4,231313297	38,690818	0	2,54429	0,2537316	0,24644979	C1 - CARBAPATITE	C1 - CARB
Patient 98 - Couche Externe - Zone 1	1,551819	100	0	0	0	0	0	0	1,25793	0	0	C2	C2
Patient 99 - Couche Externe - Zone 1	1,080928	100	0	0	0	0	0	0	1,21204	0	0	C2	C2
Patient 99 - Section - Couche interne	85,95034	7,357501	0,110261	0,7667794	2,543333045	0	0	0,03045	0	0,11055	0,06632685	C1	C1
Patient 99 - Noyau -	85,31636	1,81936	0,026728	0,3833371	5,770757063	0,396311707	0	0	0	0,0469485	0,06072537	C1	C1
Patient 100 - Couche Externe - Zone 1	76,33216	2,905931	0,062273	0	6,224386011	0	4,6170608	6,32143	1,86523	0,1143324	0	C1	C1
Patient 100 - Couche Externe - Zone 2	100	0,340399	0,208709	1,6684789	0,315714572	0	0	1,56693	0	0	0,09332107	C1	C1
Patient 100 - Noyau -	86,24382	0,550693	0	2,1387751	3,22106349	0,266380825	2,3538865	0	0,07664	0	0,02397395	C1	C1
Patient 100 - Section - Couche interne	31,14031	0	0	3,5481545	4,063334801	2,852360432	3,9604389	0	0	0,1698387	0,02755203	C1	C1
Patient 101 - Couche Externe - Zone 1	85,27102	19,82814	0,236745	0,1931809	5,654044723	3,717879249	0	5,71995	0,30083	0	0,04228526	C1 - C2	C1
Patient 102 - Couche Externe - Zone 1	10,21624	77,87008	0	0	0	4,804371214	6,2463547	7,3231	0,62003	0	0,24846773	C2 - C1	c2 - C1
Patient 102 - Noyau -	80,57488	15,30188	0,234384	0	0	7,025223747	2,6468053	6,44303	0	0,0444533	0,07743168	C1 - C2	C1- C2
Patient 102 - Section - Couche interne	76,87346	0	0	1,86936	0	8,319520217	8,6147816	11,3058	0,48304	0,003131	0,04478019	C1 - STRUVIT	c1 - CARB
Patient 103 - Couche Externe - Zone 1	94,08196	0	0	0,4235869	3,237050195	5,768360779	1,6561048	5,71163	0,4163	0	0,04338337	C1	c1
Patient 104 - Couche Externe - Zone 1	0	0,746181	0	19,817393	4,065437032	76,14114383	0	1,26199	0,12537	0,0734876	0,00788057	URATE - AU0	AU0 - URATE
Patient 105 - Couche Externe - Zone 1	1,242914	100	0	0	0	0	0	0	1,2558	0	0	C2	c2

ANNEXE 20 : Comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs enregistrées

Nom échantillon Modele	Prédiction (Composés majoritaires)	Identification initiale (Composés majoritaires)
Patient 1 - Couche Externe - Zone 1	AU0 - AU2 - URATE	AU0 - AU2
Patient 1 - Section - Couche interne	AU0 - C2 - C1	AU0
Patient 2 - Couche Externe - ZONE 1	CARBAPATITE - BRUSHITE	CARB - BRUSH
Patient 3 - Couche Externe - Zone 2	C2	C2
Patient 3 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1 - C2
Patient 4 - Couche Externe - Zone 2	C2 - CARBAPATITE	C2 - CARB
Patient 4 - Couche Externe - Zone 1	C2	C2
Patient 5 - Section - Couche profonde 2	C2 - CARBAPATITE	C2 - CARB
Patient 5 - Section - Couche profonde 1	C1 - C2	C1 - C2
Patient 5 - Section - Couche interne	C1 - CARBAPATITE - URATE	C1-CARB-URATE
Patient 5 - Couche Externe - zone 3	C1 - C2	C1 - C2
Patient 5 - Couche Externe - Zone 2	C2	C2 - CARB - C1
Patient 5 - Couche Externe - Zone 1	C2	C2
Patient 5 - Noyau -	CARBAPATITE	CARB
Patient 6 - Couche Externe - Zone 2	C1 - C2	C1 - C2
Patient 6 - Couche Externe - Zone 1	C2	C2
Patient 7 - Couche Externe - Zone 2	C1 - C2	C1 - C2
Patient 7 - Section - Couche interne	C1	C1
Patient 7 - Couche Externe - Zone 1	C2	C2
Patient 8 - Couche Externe - Zone 1	CARBAPATITE - URATE - STRUVIT - C1 - AU2	CARB - URATE - C1
Patient 8 - Section - Couche interne	CARBAPATITE - C1 - BRUSHITE	CARB - C1
Patient 9 - Section - Couche interne	URATE - CARBAPATITE - AU2 - STRUVIT - C1	URATE - CARB - C1
Patient 9 - Noyau -	URATE - STRUVIT - CARBAPATITE - AU2 - C1	URATE -CARB - C1
Patient 9 - Couche Externe - Zone 1	CARBAPATITE - URATE - STRUVIT - C1 - AU2	CARB - URATE - C1
Patient 10 - Section - Couche profonde 1	C1 - CARBAPATITE - URATE	CARB - URATE
Patient 10 - Section - Couche interne	CARBAPATITE - C1 - C2 - BRUSHITE	CAR -URATE -C1 -C2
Patient 10 - Couche Externe - Zone 2	CARBAPATITE - URATE - STRUVIT - C1 - AU2	CAR -URATE -C1
Patient 10 - Couche Externe - Zone 1	CARBAPATITE - URATE - C2 - C1	CAR -URATE -C1 -C2
Patient 10 - Noyau - Couche profonde 1	CARBAPATITE - URATE - C2 - C1	CARB - URATE
Patient 11 - Section - Couche profonde 1	C1 - CARBAPATITE	C1- CARB
Patient 11 - Section - Couche interne	C1 - CARBAPATITE - URATE	C1 - CARB -URATE
Patient 11 - Noyau - Couche profonde 1	C1 - URATE	C1 -URATE
Patient 11 - Couche Externe - Zone 1	CARBAPATITE - STRUVIT	CARB - URATE
Patient 12 - Section - Couche interne	C1 - CARBAPATITE - URATE	C1 -CARB -URATE
Patient 12 - Couche Externe - Zone 1	C1 - CARBAPATITE - URATE	C1 -CARB - URATE
Patient 13 - Couche Externe - Zone 1	C2	c2
Patient 14 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1
Patient 14 - Noyau -	AU2 - C1 - AU0	AU2 - C1 - AU0
Patient 14 - Section - Couche interne	C1 - AU2 - CARBAPATITE	C1 - AU2
Patient 15 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1 - C2
Patient 18 - Noyau -	C1	C1
Patient 18 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1
Patient 19 - Section - Couche interne	URATE - AU2 - CARBAPATITE	URATE - CARB
Patient 19 - Couche Externe - Zone 1	CARBAPATITE - C1 - URATE	CARB - URATE -C1
Patient 20 - Noyau -	C1 - C2	C1
Patient 20 - Couche Externe - Zone 1	C1	C1
Patient 20 - Section - Couche interne	C1	C1
Patient 21 - Couche Externe - Zone 1	C1	C1
Patient 21 - Noyau -	C1	C1
Patient 21 - Section - Couche interne	C1	C1
Patient 22 - Couche Externe - Zone 2	C2 - CARBAPATITE	C2 -CARB
Patient 22 - Couche Externe - Zone 1	C2 - CARBAPATITE	C2 -CARB
Patient 22 - Couche Externe - Zone 3	C2	C2
Patient 22 - Noyau -	C1 - CARBAPATITE	C1 -CARB
Patient 22 - Section - Couche interne	CARBAPATITE - C1	CARB -C1
Patient 23 - Section - Couche profonde 1	C2 - AU2 - AU0	AU2
Patient 23 - Couche Externe - Zone 1	AU0	AU0
Patient 23 - Noyau -	AU2 - C2 - AU0	AU2 - AU0
Patient 23 - Section - Couche interne	AU2 - C2 - AU0	AU2 - AU0
Patient 24 - Couche Externe - Zone 1	AU0 - CARBAPATITE - C1	AU0 - C1
Patient 24 - Section - Couche interne	AU0 - CARBAPATITE - C1	AU0 - C1
Patient 25 - Couche Externe - Zone 1	AU2 - C2 - AU0 - CARBAPATITE	AU0 - C2 - AU2 -CARB
Patient 25 - Section - Couche interne	C1 - AU2	C1 - AU2
Patient 25 - Noyau -	C1 - C2	C1
Patient 26 - Section - Couche profonde 1	CARBAPATITE - C2	CARB - C2
Patient 26 - Section - Couche interne	CARBAPATITE	CARB
Patient 26 - Couche Externe - Zone 1	CARBAPATITE - C2 - AU2	CARB - C2
Patient 27 - Section - Couche interne	AU0 - C2	AU0- C2
Patient 27 - Noyau -	AU0	AU0
Patient 27 - Couche Externe - Zone 1	AU0	AU0
Patient 28 - Couche Externe - Zone 1	C2 - C1 - AU2	C2 - C1
Patient 28 - Noyau -	C1	C1
Patient 28 - Section - Couche interne	C1	C1
Patient 29 - Couche Externe - Zone 1	C2 - C1 - AU2	C2 -C1-CARB
Patient 29 - Section - Couche interne	C1 - CARBAPATITE	C1-CARB
Patient 30 - Section - Couche interne	C1	C1

ANNEXE 20. Comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs enregistrées (suite)

Patient 30 - Couche Externe - Zone 1	C1 - CARBAPATITE	C1-CARB
Patient 31 - Noyau -	C2 - C1 - CARBAPATITE	C2 -C1-CARB
Patient 31 - Couche Externe - Zone 1	C2	C2
Patient 31 - Section - Couche interne	C2 - C1 - CARBAPATITE	C2 -C1-CARB
Patient 32 - Section - Couche interne	C1 - C2	C1- C2
Patient 32 - Noyau -	C1 - C2	C1- C2
Patient 32 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1- C2
Patient 33 - Section - Couche interne	C1	C1
Patient 33 - Couche Externe - Zone 1	C1	C1
Patient 34 - Couche Externe - Zone 1	CARBAPATITE - STRUVIT	CARB - STR
Patient 34 - Noyau -	STRUVIT - C2 - CARBAPATITE	STR-C2-CARB
Patient 34 - Section - Couche interne	STRUVIT - C2	STRU - C2
Patient 35 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1
Patient 36 - Couche Externe - Zone 1	AU0 - CARBAPATITE - C1	AU0 -CARB -C1
Patient 37 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1 - C2
Patient 37 - Noyau -	C1 - C2	C1 -C2
Patient 37 - Section - Couche interne	C1 - C2	C1 -C2
Patient 38 - Section - Couche interne	CARBAPATITE	CARB
Patient 38 - Noyau -	CARBAPATITE - C1 - AU2	CARB -C1
Patient 38 - Couche Externe - Zone 2	CARBAPATITE - STRUVIT	CARB -STR
Patient 38 - Couche Externe - Zone 1	CARBAPATITE - AU2	CARB
Patient 39 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1
Patient 39 - Section - Couche interne	C1 - C2	C1
Patient 40 - Couche Externe - Zone 1	AU0 - CARBAPATITE	AU0 - CARB
Patient 40 - Section - Couche interne	AU0 - URATE	AU0 - URATE
Patient 41 - Couche Externe - Zone 1	AU0 - CARBAPATITE	AU0
Patient 41 - Noyau -	AU0 - CARBAPATITE - C1	AU0 -CARB -C1
Patient 41 - Section - Couche interne	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 42 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1- C2
Patient 42 - Noyau -	C1 - C2	C1
Patient 42 - Section - Couche interne	C1 - C2	C1
Patient 43 - Noyau -	C1 - C2	C1
Patient 43 - Couche Externe - Zone 1	C2	C2
Patient 43 - Section - Couche interne	C1 - C2	C1
Patient 44 - Couche Externe - Zone 1	AU0 - C2 - C1	AU0- C2 -C1
Patient 44 - Noyau -	AU0 - C2 - C1	AU0- C2 -C1
Patient 44 - Section - Couche interne	AU0 - AU2 - C1	AU0 - AU2 -C1
Patient 45 - Couche Externe - Zone 2	C1 - C2	C1- C2
Patient 45 - Couche Externe - Zone 3	C1 - CARBAPATITE	C1 -CARB
Patient 45 - Noyau -	C1	C1
Patient 45 - Section - Couche interne	C1	C1
Patient 45 - Couche Externe - Zone 1	C2	C2
Patient 46 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1
Patient 46 - Noyau -	C1 - C2	C1
Patient 46 - Section - Couche interne	C1 - C2	C1
Patient 47 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1
Patient 48 - Section - Couche interne	AU0 - C2 - STRUVIT - C1	AU0
Patient 48 - Noyau -	AU0 - CARBAPATITE	AU0
Patient 48 - Couche Externe - Zone 1	AU0 - C1 - STRUVIT	AU0- C1
Patient 49 - Couche Externe - Zone 1	C1	C1
Patient 49 - Section - Couche interne	C1	C1
Patient 50 - Couche Externe - Zone 1	C1	C1
Patient 51 - Section - Couche interne	C1 - CARBAPATITE - C2	C1- CARB
Patient 51 - Couche Externe - Zone 2	C2 - C1	C2 -C1
Patient 51 - Noyau -	C1 - C2	C1
Patient 51 - Couche Externe - Zone 1	C2	C2
Patient 52 - Couche Externe - Zone 1	C1	C1
Patient 53 - Couche Externe - Zone 1	C1 - CARBAPATITE	C1- CARB
Patient 53 - Section - Couche interne	C1 - CARBAPATITE	C1- CARB
Patient 54 - Section - Couche interne	AU0 - AU2 - C1	AU0- AU2-C1
Patient 54 - Couche Externe - Zone 1	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 54 - Noyau -	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 55 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1
Patient 56 - Couche Externe - Zone 1	AU0 - AU2 - C1	AU0 -AU2 -C1
Patient 57 - Section - Couche interne	AU2	AU2
Patient 57 - Couche Externe - Zone 1	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 58 - Couche Externe - Zone 1	AU2	AU2
Patient 58 - Section - Couche interne	AU2	AU2
Patient 59 - Section - Couche interne	C1	C1
Patient 59 - Couche Externe - Zone 1	C2	C2
Patient 59 - Noyau -	C1	C1
Patient 60 - Couche Externe - Zone 1	C1 - URATE	C1 -URATE
Patient 61 - Section - Couche interne	C1 - C2	C1
Patient 61 - Noyau -	C1	C1
Patient 61 - Couche Externe - Zone 1	C1	C1
Patient 62 - Couche Externe - Zone 1	CARBAPATITE - C2 - STRUVIT	CARB - WITLOKITE -C2
Patient 62 - Section - Couche interne	CARBAPATITE - C2 - STRUVIT	CARB - WITLOKITE - C2
Patient 63 - Couche Externe - Zone 1	C2	C2
Patient 64 - Noyau -	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 64 - Couche Externe - Zone 1	AU0 - AU2	AU2- AU0
Patient 64 - Section - Couche interne	AU0 - AU2 - C1	AU0 -AU2 -C1
Patient 65 - Couche Externe - Zone 1	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 65 - Section - Couche interne	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 66 - Couche Externe - Zone 1	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB

ANEXE 20 : Comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs enregistrées (suite)

Patient 66 - Section - Couche interne	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 67 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1
Patient 68 - Couche Externe - Zone 1	C2	C2
Patient 69 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2 - AU2	C1 -C2 -AU2
Patient 70 - Couche Externe - Zone 1	C2 - STRUVIT	C2 -STR
Patient 70 - Section - Couche interne	C2 - CARBAPATITE	C2 -CARB
Patient 71 - Section - Couche interne	AU0 - CARBAPATITE	AU0
Patient 71 - Noyau -	AU0 - CARBAPATITE - C1	AU0 -CARB -C1
Patient 71 - Couche Externe - Zone 1	AU0 - CARBAPATITE - C1	AU0 -CARB -C1
Patient 72 - Couche Externe - Zone 1	CARBAPATITE - C2 - BRUSHITE	CARB -C2 -BRUSH
Patient 73 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1
Patient 74 - Noyau -	URATE	URATE
Patient 74 - Section - Couche interne	URATE	URATE
Patient 74 - Couche Externe - Zone 1	AU0 - CARBAPATITE	AU0 -CARB
Patient 75 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1- C2
Patient 75 - Section - Couche interne	C1 - C2	C1- C2
Patient 75 - Noyau -	C1 - C2	C1- C2
Patient 76 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1- C2
Patient 77 - Couche Externe - Zone 1	CARBAPATITE - C2	CARB -C2
Patient 77 - Noyau -	CARBAPATITE - C2 - AU2	CARB -C2
Patient 77 - Section - Couche interne	CARBAPATITE - C2 - AU2	CARB -C2
Patient 78 - Couche Externe - Zone 1	C2 - C1	C2 -C1
Patient 78 - Section - Couche interne	C1	C1
Patient 79 - Couche Externe - Zone 1	C1	C1
Patient 80 - Couche Externe - Zone 1	C1 - CARBAPATITE	C1 -CARB
Patient 81 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1
Patient 82 - Couche Externe - Zone 1	C1	C1
Patient 83 - Couche Externe - Zone 1	C1 - URATE	C1 - URATE
Patient 83 - Section - Couche interne	C1 - URATE	C1 - URATE
Patient 83 - Noyau -	C1 - URATE	C1 - URATE
Patient 84 - Noyau -	C1	C1
Patient 84 - Couche Externe - Zone 1	C2	C2
Patient 84 - Section - Couche interne	C1	C1
Patient 85 - Couche Externe - Zone 1	C2 - CARBAPATITE	C2 -CARB
Patient 85 - Section - Couche interne	C1	C1
Patient 86 - Couche Externe - Zone 1	CARBAPATITE - C2	CARB -C2
Patient 86 - Section - Couche interne	CARBAPATITE - C2 - AU2	CARB -C2
Patient 86 - Noyau -	CARBAPATITE - C2 - AU2	CARB -C2
Patient 87 - Section - Couche profonde 1	AU0 - STRUVIT - CARBAPATITE - AU2	AU0 - CARB -AU2
Patient 87 - Section - Couche interne	AU2 - CARBAPATITE - STRUVIT - URATE	AU2- C1
Patient 87 - Noyau -	C1	C1
Patient 87 - Couche Externe - Zone 2	STRUVIT - CARBAPATITE - AU0	CARB - AU0
Patient 87 - Couche Externe - Zone 1	STRUVIT - CARBAPATITE - C1 - BRUSHITE	AU0 - CARB - C1
Patient 88 - Couche Externe - Zone 2	C2	C2
Patient 88 - Couche Externe - Zone 1	C2 - CARBAPATITE	C2 - CARB
Patient 88 - Section - Couche interne	C2	C2
Patient 88 - Noyau -	C1 - CARBAPATITE	C1 - CARB
Patient 89 - Section - Couche profonde 1	CARBAPATITE	CARB
Patient 89 - Section - Couche interne	CARBAPATITE	CARB
Patient 89 - Noyau -	CARBAPATITE - C2	CARB
Patient 89 - Couche Externe - Zone 1	CARBAPATITE	CARB
Patient 89 - Couche Externe - Zone 2	CARBAPATITE - C1	CARB - C1
Patient 90 - Couche Externe - Zone 1	C1 - CARBAPATITE - C2	C1 - CARB - C2
Patient 91 - Couche Externe - Zone 2	C2	C2
Patient 91 - Section - Couche interne	C2 - C1	C1 - C2
Patient 91 - Couche Externe - Zone 1	C2 - C1	C2 - C1
Patient 92 - Couche Externe - Zone 3	C1 - URATE	C1 - URATE
Patient 92 - Couche Externe - Zone 1	URATE - BRUSHITE - CARBAPATITE - CALCITE - C1	C1 - AU0 - CARB
Patient 92 - Section - Couche profonde 1	AU0 - C2 - AU2	AU0 - C2 - AU2
Patient 92 - Section - Couche interne	STRUVIT - CARBAPATITE - C1 - BRUSHITE - AU0	AU0 - C1 - AU2
Patient 92 - Couche Externe - Zone 2	AU0 - C2 - AU2	AU0 - C2 - AU2
Patient 92 - Noyau -	AU0 - C2 - AU2	AU0 - C2 - AU2
Patient 93 - Section - Couche interne	STRUVIT - C2	STRUVIT - C2
Patient 93 - Noyau -	STRUVIT - C2	STRUVIT - C2
Patient 93 - Couche Externe - Zone 1	CARBAPATITE	CARB
Patient 94 - Section - Couche interne	C1 - URATE	C1 - URATE
Patient 94 - Couche Externe - Zone 1	C1 - STRUVIT - URATE	C1 - URATE
Patient 94 - Noyau -	C1 - URATE	C1 - URATE
Patient 95 - Section - Couche interne	C1 - CARBAPATITE	C1 - CARB
Patient 95 - Noyau -	C1 - CARBAPATITE	C1 - CARB
Patient 95 - Couche Externe - Zone 2	C1 - C2	C2 - C1
Patient 95 - Couche Externe - Zone 1	C2	C2
Patient 96 - Couche Externe - Zone 1	C2 - BRUSHITE - CARBAPATITE	CARB - BRUSH - C2
Patient 97 - Couche Externe - Zone 1	C2	C2
Patient 98 - Section - Couche interne	C1 - CARBAPATITE	C1 - CARB
Patient 98 - Noyau -	C1 - CARBAPATITE	C1 - CARB
Patient 98 - Couche Externe - Zone 1	C2	C2
Patient 99 - Couche Externe - Zone 1	C2	C2
Patient 99 - Section - Couche interne	C1	C1
Patient 99 - Noyau -	C1	C1
Patient 100 - Couche Externe - Zone 1	C1	C1
Patient 100 - Couche Externe - Zone 2	C1	C1
Patient 100 - Noyau -	C1	C1

ANEXE 20. Comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs enregistrées (suite)

Patient 100 - Section - Couche interne	C1	C1
Patient 101 - Couche Externe - Zone 1	C1 - C2	C1
Patient 102 - Couche Externe - Zone 1	C2 - C1	c2 - C1
Patient 102 - Noyau -	C1 - C2	C1 - C2
Patient 102 - Section - Couche interne	C1 - STRUVIT	c1 - CARB
Patient 103 - Couche Externe - Zone 1	C1	c1
Patient 104 - Couche Externe - Zone 1	URATE - AU0	AU0 - URATE
Patient 105 - Couche Externe - Zone 1	C2	c2

ANNEXE 21: Tableau des scores ACP moyens par classe (PC1–PC3)

PC1	PC2	PC3	Classe
4,26806277	-13,4332417	0,206303634	AU0
-21,3788905	-3,09420358	-0,75439221	AU0
3,3645459	7,31603755	-10,1383071	CARBAPATITE
-4,65135072	3,65514777	6,663829066	C2
-0,22404427	8,40643793	1,827031701	C1
7,14581859	8,04314892	-0,3258828	C2
-0,76430635	4,12400881	4,030643477	C2
6,71478338	8,18887438	-0,29443783	C2
5,09461352	8,03072976	-0,84887817	C1
5,35704142	4,51396283	1,88231811	C1
8,39801313	1,85627043	-13,2376863	C1
21,8183266	-2,57713698	1,292598267	C2
1,36654131	4,86178159	3,78353169	C2
-0,60622626	4,19481975	-0,82482153	CARBAPATITE
6,71130762	8,27585137	-0,30380053	C1
2,86124648	6,70819322	2,632836726	C2
0,91500021	8,15634664	1,672894858	C1
6,11125122	4,58173273	1,653720634	C1
-1,23606605	3,51113934	5,703353072	C2
-79,5086683	22,4443892	-11,1445966	CARBAPATITE
42,0042357	-29,3445685	-7,98082944	CARBAPATITE
-72,6410318	20,3512248	-10,4557931	URATE
-87,1332454	12,712348	-3,96110531	URATE
-71,5602302	12,2398534	-8,82361517	CARBAPATITE
32,7705531	-23,8300714	-7,81822529	C1
-76,333935	21,4018569	-10,8368011	CARBAPATITE
35,5720164	-25,3233987	-7,6923112	CARBAPATITE
45,3717702	-31,2440209	-7,31695092	CARBAPATITE
-17,6274378	2,3490188	-3,39795192	CARBAPATITE
-21,3057577	5,76393474	-10,6095856	C1
0,22445174	4,90234644	4,074310224	C1
-15,3593946	1,74474186	-3,59017875	C1
-6,13538606	5,57557128	3,431754558	CARBAPATITE
-21,3075081	3,60522697	-4,27802758	C1
-20,3297858	3,28321262	-4,25373433	C1
-0,87186607	7,43875729	2,391081248	C2
-4,52545805	4,56381394	6,228961636	C1
-7,3860585	-5,65447218	-3,46121836	AU2
14,4863427	4,11206012	-1,77568598	C1
-2,14244969	4,24958575	5,883541189	C1
5,35704142	4,51396283	1,88231811	C1
-0,82266549	7,2422891	2,362187139	C1
-0,82266549	7,2422891	2,362187139	C1
-7,31435428	-5,36271584	-3,63425321	AU2
2,75630683	7,30192819	2,011612855	C1
-4,0052683	4,44961958	6,163638132	C1
-1,2923799	3,65122458	5,6201845	C1
-1,30959714	3,64071202	5,636111897	C1
-49,8901503	12,3655069	-10,063144	URATE
-30,1548374	-6,75050532	-4,32828351	CARBAPATITE
2,6860233	4,96686352	3,796272526	C1
-3,21341975	4,01875223	6,174585678	C1
-1,38081379	3,62053393	5,662751089	C1
5,40568247	6,30280152	1,030910153	C1
5,46720383	6,13018273	1,063080673	C1
5,3565512	6,20963647	1,084528131	C1
10,5697677	3,41785747	-0,36608929	C2
16,5349846	2,00662249	-0,29487552	C2
15,7885063	2,02178105	1,608813556	C2
5,62452261	2,22029435	-1,92687342	C1
-5,73913905	7,51185552	-5,39707453	CARBAPATITE
4,35348438	-16,4553481	1,783070752	C2
3,03297534	-5,63539047	-1,83722126	AU0
-4,00665999	-15,8473685	-0,07943638	AU2
-12,5067466	-18,3608343	1,318661711	AU2
-8,82412454	-27,8425588	4,280648611	AU0
-9,89124221	-27,1742983	4,139162224	AU0
-24,1370371	-9,30732551	1,953036907	AU2
-15,6038541	9,40670441	6,066371939	C1
1,82151758	-0,6464577	4,132362276	C1
14,1485036	4,52487964	-8,30080896	CARBAPATITE
12,5657492	-0,09028773	-8,93893685	CARBAPATITE
15,7450812	1,74847644	-9,83895371	CARBAPATITE
2,06973145	-15,7753642	2,054392396	AU0
1,50181643	-15,3234606	1,390031409	AU0
-0,11235205	-15,1093229	1,882074762	AU0
10,7326233	1,61985974	3,698826391	C2
-1,24978215	3,77093985	4,409523618	C1
19,7028109	-2,39448255	4,001862609	C1
10,000085	1,76036968	3,760443708	C2
20,0160471	-2,69317066	0,673406369	C1
12,5377041	7,04916845	-1,07027666	C1
19,7014965	2,90351183	1,521828829	C1
6,78801547	-0,08635083	-12,3349103	STRUVIT
1,6006803	7,62288641	2,531782989	C1
-11,0154082	-26,6879546	4,215529378	AU0
1,82557137	7,57265074	2,482546744	C1
1,8572999	7,49685785	2,529834702	C1
1,80134829	7,50302493	2,540259822	C1
20,1334913	-1,35631412	-11,9712256	CARBAPATITE
25,8678324	-2,4512212	-9,17482385	CARBAPATITE
16,4200904	4,35731324	-7,12536826	CARBAPATITE
17,8507863	-0,11103487	-8,71633377	CARBAPATITE
-4,37045467	4,84100311	6,277828811	C1
-4,94233348	4,83468523	6,276156423	C1
-21,92062	-3,26351053	-0,32014317	AU0
16,7233618	-3,25416892	-1,45412625	AU0
-16,2270893	-23,8346389	4,391030591	AU0
-13,5773942	-25,2372256	4,332258405	AU0
-15,2368613	-24,221132	4,287363993	AU0
1,57397413	7,59347136	2,566933536	C1
1,67038556	7,58324374	2,556807494	C1
1,61238436	7,53734954	2,6233065	C1
1,43417448	8,26340014	1,312741171	C1
1,93907562	5,36733185	3,825048486	C2
2,05376427	5,32636889	3,744303765	C1
-22,4952568	-2,35789082	-0,77680396	AU0
0,52137577	-8,298135	0,301118499	AU0
8,74157066	0,5855264	-1,71085374	AU0
-1,9074888	7,35313044	2,471627728	C1
-0,72973385	4,5234837	4,239493479	C1
23,2628991	-0,66433483	2,385893211	C1
13,6155409	3,33359682	0,537558305	C1
15,3257239	2,62548401	0,814432127	C2
1,31116929	6,3017674	3,156680863	C1
1,17703657	7,02099131	3,142350491	C1
1,32110823	6,36213353	3,134650263	C1
2,36881701	6,58160416	2,636562541	C1
-1,32977161	-5,01087053	-0,67591319	AU0
-15,1457041	-24,3922629	4,352244417	AU0
-0,61053588	-5,44111241	-0,67419354	AU0
-1,43262209	3,73728133	5,539911392	C1
-1,50531481	3,68329497	5,680201091	C1
-0,35445272	7,35118309	2,359288756	C1
-1,84461832	7,3272554	2,431231193	C1
-11,5615015	-26,4430297	4,320847527	AU0
-13,5773942	-25,2372256	4,332258405	AU0
-16,37649	-23,7251164	4,382562255	AU0
16,1315363	4,58150441	-5,85058325	CARBAPATITE
-3,28072407	3,32017958	6,313358738	C1
-11,7338842	-11,2034393	1,305494907	URATE
-0,68381158	-7,2585177	-0,19340649	URATE
-0,21773383	-7,43744278	-0,13255559	AU0
0,6542936	4,39277731	4,342073111	C1
0,29351583	5,02647778	4,501374165	C1
1,23231272	5,53187071	3,759025107	C1
1,26680712	6,39028571	3,135108763	C1
18,7363473	-0,94362036	-9,76396793	CARBAPATITE
17,3007023	1,06632683	-11,36383	CARBAPATITE
17,276014	2,12052072	-9,89013238	CARBAPATITE
-2,71236708	5,38684239	4,231276553	C2
9,08327344	1,76654954	3,455591397	C1
-7,81672645	4,66733341	6,217600727	C1
17,8644252	4,07868082	0,486204292	C1
2,62130957	7,35240636	2,028138369	C1
-0,50080801	7,10315651	2,360133006	C1
4,45335013	5,17186123	2,569477176	C1
0,48788752	4,79324253	2,765539289	C1
-4,9746659	0,51312701	5,255248344	C1
-2,83272111	5,5117278	4,193750134	C1
-0,63433582	3,65071431	4,446991422	C2
-1,31551052	3,6536929	5,621004263	C1
-3,86037174	5,17237216	5,22808226	C2
-0,87548385	7,25870552	2,955668251	C1
18,5030432	-1,16050409	-9,56189856	CARBAPATITE
17,3591325	1,09389086	-11,4650863	CARBAPATITE
17,0901626	0,37731563	-11,2585495	CARBAPATITE
-41,3047043	-24,4442359	4,512181544	AU0
-19,3517236	-12,8020164	4,82726657	AU2
-1,44243397	4,01351165	4,52813792	C1
-43,6733566	-16,3734556	1,337438752	STRUVIT
-21,4261568	-8,39673902	2,488168937	STRUVIT
-4,06326385	5,1503357	5,308026081	C2
14,5985938	5,60713243	0,610209318	C2
10,1461575	3,12443936	0,336212229	C2
4,15635125	7,57093542	0,121073228	C1
25,2863737	2,17301143	-8,54916237	CARBAPATITE
1,36948716	5,85573496	2,713690424	C2
0,53547292	7,75846932	2,265025863	C2
-36,3434027	-6,27623866	-25,7524775	C1
-6,21408312	-14,6545096	0,558004249	URATE
10,2161054	-1,70102835	4,804565347	AU0
-7,06974593	-18,0320685	2,315365279	STRUVIT
-51,979385	-8,39843165	-29,0278131	AU0
-6,12753404	-15,4456993	0,874362623	AU0
-0,77296724	2,82178125	-13,6820307	STRUVIT
8,89162059	-8,6068469	-16,0804178	STRUVIT
3,31046629	-3,02922843	-16,0193316	CARBAPATITE
3,50610504	4,04259701	-0,32298201	C1
-4,96375635	0,53394579	5,162630955	C1
0,62073159	3,72525992	4,153323542	C1
-1,31354991	5,13767275	4,147657037	C1
-0,5874334	5,80511992	2,538841354	C1
-1,680677	5,77543195	0,464045216	C1
-0,36866614	5,84044836	0,780355747	C2
22,2975129	-4,79615979	0,543867215	C2
6,35501801	8,4378248	-0,28984938	C2
6,2742683	8,46454404	-0,28062831	C1
4,22538921	3,26149462	-2,24303398	C1
-1,48937383	4,89812843	-3,44118394	C2
6,26445478	8,53206599	-0,29417561	C2
-0,45856461	7,03764064	2,379462508	C1
-0,51725061	7,13489323	2,93690125	C1
5,87517255	7,25586477	-0,31271421	C1
-0,26763961	2,34350385	4,374670815	C1
15,7064747	1,07015879	2,93558062	C1
10,9848395	1,44541114	3,327753122	C1
3,21973977	6,51290833	2,617315756	C1
-0,40107385	5,19487633	3,68923565	C2
-1,80360482	4,50303759	4,420445279	C1
-0,64633128	5,28708416	2,338071973	C1
2,6860233	4,96686352	3,796272526	C1
18,4715391	-14,1432245	-1,12614766	URATE
5,90597047	8,63683778	-0,23314428	C2

ANNEXE 22 : Loadings (poids) des nombres d'onde sur PC1, PC2, PC3

	PC1	PC2	PC3
401,2	0,027542388	0,037202628	-0,021702345
408,9	0,026767799	0,036077459	-0,029478694
416,6	0,027058892	0,025218281	-0,024875106
424,3	0,026992487	0,031137301	-0,033156799
432,1	0,02613386	0,031162456	-0,028300838
439,8	0,022989938	0,033378819	-0,034953601
447,5	0,022272823	0,037693707	-0,010847918
455,2	0,017316144	0,028326654	0,000920071
462,9	0,006085729	-0,001176604	0,012611601
470,6	0,020653144	0,051745933	-0,069408719
478,3	0,029187321	0,038597675	-0,082368936
486,1	0,029688511	0,011556525	-0,08414761
493,8	0,029229487	0,018344577	-0,108941497
501,5	0,027464114	0,02964297	-0,124057319
509,2	0,027839812	0,037939382	-0,122867162
516,9	0,03039834	0,047651284	-0,106478006
524,6	0,032443854	0,053185667	-0,067329772
532,4	0,028990679	0,048798991	-0,020395267
540,1	0,027560879	0,054874235	0,01535819
547,8	0,0278244	0,062818753	0,039624297
555,5	0,027278787	0,06775615	0,047271886
563,2	0,028093508	0,0722284	0,037188201
570,9	0,030652189	0,07406314	0,017784582
578,6	0,035713206	0,065214348	0,004057287
586,4	0,038097432	0,048590679	-0,006655702
594,1	0,037361115	0,050330934	-0,004181815
601,8	0,035904538	0,062440683	-0,003366147
609,5	0,03378629	0,070160936	-0,028686843
617,2	0,033546511	0,068873088	-0,04474207
624,9	0,037348492	0,054369902	-0,057523071
632,7	0,038084393	0,036066515	-0,06824045
640,4	0,036761532	0,037611257	-0,077258529
648,1	0,035103193	0,043883079	-0,08431974
655,8	0,034432241	0,047729168	-0,086008462
663,5	0,034411197	0,051164112	-0,083310042
671,2	0,034902636	0,058306245	-0,073591049
678,9	0,035116905	0,065315637	-0,061491201
686,7	0,034643261	0,070937464	-0,049223304
694,4	0,033590987	0,074650991	-0,038810786
702,1	0,033188776	0,076177929	-0,029881974
709,8	0,035184068	0,075391425	-0,021222537
717,5	0,036788769	0,074040565	-0,011958142
725,2	0,035464654	0,075491253	-0,010935215
733	0,033323158	0,076995331	-0,014500672
740,7	0,03272571	0,07677667	-0,016666
748,4	0,035885889	0,072951309	-0,020873718
756,1	0,039634612	0,066766881	-0,033572733
763,8	0,039018584	0,06659567	-0,0452881
771,5	0,036433971	0,063301239	-0,067591555
779,2	0,034234226	0,059030371	-0,080040304
787	0,036299866	0,068998537	-0,051821153
794,7	0,035627321	0,073149983	-0,010241047
802,4	0,035409568	0,07235327	0,008880909
810,1	0,036532778	0,071046351	0,019569775
817,8	0,038400767	0,068240493	0,031210339
825,5	0,040014012	0,064122049	0,044854949
833,2	0,040878451	0,059985773	0,055791687
841	0,041285809	0,057813772	0,060772414
848,7	0,041400781	0,057873463	0,060392024
856,4	0,04085029	0,059924853	0,057004893
864,1	0,039527357	0,063679926	0,052368726
871,8	0,03851337	0,066472759	0,047922864
879,5	0,039374579	0,064910119	0,046380022
887,3	0,041284887	0,058474017	0,0528971
895	0,04209942	0,050501579	0,065700384
902,7	0,041641483	0,043428515	0,076935349
910,4	0,041281392	0,038444972	0,082507309
918,1	0,040933398	0,035518048	0,086630844
925,8	0,040431638	0,034475825	0,090401443
933,5	0,039397416	0,033248615	0,095405391
941,3	0,037555349	0,03133382	0,101804504
949	0,034628624	0,028013486	0,110202044
956,7	0,0319976	0,029636881	0,116534419
964,4	0,031148252	0,037804123	0,116091922
972,1	0,030608516	0,048777981	0,108120205
979,8	0,028958105	0,061506776	0,092858881
987,6	0,027032181	0,067927098	0,08370034
995,3	0,024986858	0,058846142	0,106981317
1003	0,019167535	0,033207454	0,139413442
1011	0,014969382	0,023027529	0,14557926
1018	0,014822527	0,030553983	0,138469872
1026	0,015089499	0,035268068	0,131528955
1034	0,013631004	0,024609259	0,137409744
1042	0,012976599	0,014153572	0,140728912
1049	0,01436272	0,012130761	0,139569302
1057	0,016818951	0,014548908	0,136932522
1065	0,019864626	0,018359939	0,133424107
1072	0,023496062	0,02295148	0,128694611
1080	0,027196321	0,027664504	0,122360899
1088	0,030524214	0,033884142	0,112906575
1096	0,033695166	0,04332239	0,096423465
1103	0,036080001	0,058062499	0,066343329
1111	0,035276702	0,070433602	0,031778253
1119	0,034200895	0,074084996	0,013532666
1126	0,038666291	0,068221082	0,018652945
1134	0,046196546	0,04229484	0,04671912
1142	0,046305629	0,020042961	0,058305081
1150	0,046085036	0,016157996	0,051832995
1157	0,046612137	0,016165119	0,04079909
1165	0,048361791	0,018430646	0,029061175
1173	0,05052369	0,023465314	0,016597765
1180	0,05185889	0,027683549	0,006020689
1188	0,052359366	0,030487927	-0,001855992
1196	0,052385597	0,03277919	-0,007065505
1204	0,05207682	0,0355415	-0,011170328
1211	0,051331922	0,039248874	-0,015034902
1219	0,050282327	0,042895705	-0,01959316
1227	0,050000164	0,043508775	-0,023023917
1234	0,050338331	0,042134464	-0,02567352
1242	0,050175596	0,042379685	-0,028526054
1250	0,049402042	0,044548653	-0,031776823
1258	0,048402598	0,047368565	-0,034367271
1265	0,047137405	0,050623276	-0,036975389
1273	0,045504655	0,053825426	-0,041882991
1281	0,04377071	0,054909746	-0,052627378
1288	0,041850625	0,052943423	-0,068904512
1296	0,039047879	0,046523056	-0,092075208
1304	0,034361846	0,027958978	-0,119521228
1312	0,028577968	0,00265036	-0,132175501
1319	0,029280342	-0,010368997	-0,128925206
1327	0,038917221	0,002897007	-0,110232868
1335	0,046144429	0,035004757	-0,071109583
1342	0,043812856	0,056939963	-0,038644092
1350	0,043037226	0,060613011	-0,030698757
1358	0,047370859	0,051036588	-0,03163641
1366	0,050922604	0,03728459	-0,031340024
1373	0,050072107	0,038293358	-0,026594527
1381	0,047308594	0,046154818	-0,018504294
1389	0,044368335	0,055767997	-0,01207945
1396	0,042139829	0,063240763	-0,008705848
1404	0,041347863	0,06499904	-0,004498732
1412	0,041797921	0,063937862	0,000218544
1420	0,042610195	0,061870474	0,005132481
1427	0,042388987	0,061917281	0,006233278
1435	0,042648689	0,061624378	0,003662796
1443	0,045129267	0,056576258	0,003309191
1450	0,047237416	0,052221281	-0,000482561
1458	0,047707249	0,052072766	-0,010290886
1466	0,046782213	0,054056123	-0,017686199
1474	0,044947891	0,057276713	-0,023754266
1481	0,043486034	0,059329221	-0,02924705
1489	0,043541085	0,058921551	-0,032323026
1497	0,044230861	0,057418508	-0,034680264
1504	0,044446939	0,056556404	-0,03818815
1512	0,044376361	0,055827503	-0,043685301
1520	0,044098583	0,055663278	-0,048439796
1528	0,043778938	0,055509265	-0,053090228
1535	0,043406456	0,055371069	-0,057025346
1543	0,042711326	0,054411728	-0,064920159
1551	0,042033116	0,053646199	-0,070855217
1558	0,041294688	0,052281889	-0,077541475
1566	0,040647532	0,051336636	-0,081980778
1574	0,040079779	0,050599787	-0,085150554
1582	0,039459729	0,048429482	-0,090439036
1589	0,038266157	0,039817798	-0,103717054
1597	0,034901438	0,021757169	-0,121398729
1605	0,030461882	0,009455264	-0,1311181
1612	0,030776834	0,012577856	-0,133524061
1620	0,032809757	0,024320649	-0,129110109
1628	0,034838381	0,037480169	-0,117783702
1636	0,035697205	0,047764871	-0,104498202
1643	0,036091132	0,054468861	-0,091996368
1651	0,036046462	0,059543127	-0,08123844
1659	0,035652516	0,063264694	-0,072082125
1666	0,035502222	0,064881146	-0,065499491
1674	0,036345467	0,0653916	-0,055817711
1682	0,037551058	0,065080339	-0,045339161
1690	0,038808635	0,064289904	-0,034556303
1697	0,040063324	0,062707598	-0,026718931
1705	0,042968514	0,057888347	-0,018552733
1713	0,045600191	0,052961104	-0,015671265
1721	0,049415551	0,044420544	-0,014236192
1728	0,05189784	0,037042925	-0,013673641
1736	0,055555365	0,020490719	-0,009264971
1744	0,05715841	0,001532289	-0,00185803
1751	0,056723722	-0,014846734	0,006434217
1759	0,055624018	-0,024946807	0,012639062
1767	0,054138211	-0,032365889	0,017212564
1775	0,053465914	-0,034956113	0,019591862
1782	0,052823603	-0,03730129	0,021986544
1790	0,05262627	-0,037689754	0,023318289
1798	0,051761316	-0,040091494	0,02613418
1805	0,051142879	-0,04109017	0,029307506
1813	0,05023086	-0,041780087	0,033542607
1821	0,049682925	-0,040124148	0,037432449
1829	0,04905941	-0,038535231	0,040860884
1836	0,049038496	-0,036980274	0,042473425
1844	0,049563909	-0,037668588	0,040816914
1852	0,050416498	-0,040298757	0,035392488
1859	0,050837984	-0,043360482	0,027894246
1867	0,051000684	-0,044509952	0,021613191
1875	0,050511858	-0,046350364	0,019325395
1883	0,050353817	-0,046944496	0,018208202
1890	0,050204865	-0,047456514	0,01734394
1898	0,050143505	-0,047715448	0,016567482
1906	0,050149851	-0,04779787	0,015856701
1913	0,050510589	-0,046820212	0,015213625
1921	0,050715074	-0,046235325	0,015518854
1929	0,05077223	-0,046068934	0,016233754
1937	0,050628376	-0,04647619	0,016907672
1944	0,050675783	-0,046313785	0,017205434
1952	0,050557272	-0,046651237	0,017756569
1960	0,050752898	-0,046055363	0,017917795
1967	0,050809067	-0,045837328	0,018442798
1975	0,050964125	-0,04532192	0,018861211
1983	0,051187367	-0,044597704	0,019005877
1991	0,051539166	-0,043456814	0,018716499
1998	0,051575685	-0,043317213	0,01905469
2006	0,05190498	-0,04221055	0,018883733
2014	0,05261406	-0,039731046	0,017906745
2021	0,053299814	-0,037114621	0,017046898
2029	0,053137737	-0,037651403	0,018215118
2037	0,052568155	-0,03962291	0,019967061
2045	0,052029443	-0,041387872	0,021236681
2052	0,051923801	-0,041727915	0,021552883
2060	0,051976563	-0,041602302	0,021292486
2068	0,052036179	-0,041449923	0,021000178
2075	0,052001691	-0,041531722	0,02118587
2083	0,052159833	-0,04093121	0,021234437
2091	0,052316676	-0,040295434	0,021441208
2099	0,052561355	-0,039308285	0,021611743
2106	0,052728193	-0,038508413	0,022075736
2114	0,052887534	-0,037700093	0,022611411
2122	0,052900411	-0,037350219	0,02351086
2129	0,052995464	-0,036625888	0,024245488
2137	0,053060362	-0,035852395	0,025210456
2145	0,053078317	-0,035116634	0,026346113
2153	0,052911444	-0,034940551	0,027829536
2160	0,052804813	-0,034569	0,028998417
2168	0,05271626	-0,034187593	0,029946373
2176	0,052678804	-0,033448508	0,030900212
2183	0,052487395	-0,032592363	0,032563722
2191	0,052145387	-0,031251959	0,034929703
2199	0,051576878	-0,030010192	0,037653416
2207	0,051028195	-0,02877596	0,039880718
2214	0,050469568	-0,027996013	0,041701288
2222	0,050282762	-0,027402772	0,042411293
2230	0,05073864	-0,027599323	0,041586849
2237	0,051653941	-0,028103179	0,039493689
2245	0,052333132	-0,028460335	0,037741485
2253	0,052855612	-0,028165419	0,036153004
2261	0,053249303	-0,028036034	0,034686399
2268	0,053601703	-0,027800242	0,033336847
2276	0,053805381	-0,027527219	0,03269537
2284	0,053940275	-0,026772924	0,032765103
2291	0,054001272	-0,025867516	0,033271978
2299	0,054265816	-0,024886524	0,032577226
2307	0,054635271	-0,024770915	0,030132081
2315	0,054821315	-0,025328476	0,027262776
2322	0,054632758	-0,026392486	0,026051404
2330	0,054330537	-0,027144984	0,026141976
2338	0,054048893	-0,027737701	0,027306571
2345	0,054384982	-0,026036516	0,028071752
2353	0,054339291	-0,025308899	0,028630581
2361	0,053881884	-0,025982692	0,028161945
2369	0,054542781	-0,024301215	0,028978802
2376	0,055260793	-0,021075833	0,030127602
2384	0,055394351	-0,019230305	0,031854758
2392	0,055372255	-0,017832985	0,033316782
2399	0,055419406	-0,01684168	0,033683961
2407	0,056289592	-0,012488932	0,028737968
2414	0,056415371	-0,011380256	0,027903006
2422	0,05648472	-0,010625665	0,027481286
2430	0,056513257	-0,010015392	0,027371767
2437	0,056505349	-0,009367128	0,027643835
2445	0,056564511	-0,008421688	0,027233185
2453	0,056685071	-0,008100713	0,02560535
2461	0,056769354	-0,008211123	0,023502483
2469	0,056789393	-0,008133806	0,022354694
2477	0,056830282	-0,00716233	0,021625738
2484	0,056875999	-0,00573269	0,021525651
2492	0,05690062	-0,004075996	0,021628973
2500	0,056892853	-0,002851791	0,021517388
2507	0,056881798	-0,001637571	0,021610094
2515	0,056865498	-0,000344212	0,022176446
2523	0,056841451	0,001513504	0,022748101
2531	0,056794659	0,003518281	0,02300828
2538	0,056729946	0,005778274	0,022715871
2546	0,056639891	0,007955684	0,022356027
2554	0,05653894	0,010436239	0,021365882
2561	0,056396758	0,013224287	0,019865638
2569	0,056149966	0,016342278	0,018465829
2577	0,055878888	0,018949153	0,017717222
2585	0,055697217	0,020337543	0,017938293
2592	0,055645414	0,020162087	0,019746072
2600	0,055635719	0,01961115	0,021255746
2608	0,055598668	0,019664312	0,022314232
2615	0,055500965	0,020838273	0,022592471
2623	0,055339799	0,022730435	0,022397057
2631	0,055077714	0,025164386	0,021490212
2639	0,054725949	0,027608907	0,020589715
2646	0,054325961	0,029890274	0,019879917
2654	0,053972818	0,031619797	0,019763086
2662	0,053714285	0,032783072	0,019704291
2669	0,053591794	0,033287084	0,019511412
2677	0,053545155	0,033350853	0,019829269
2685	0,053534875	0,033104207	0,020923531
2693	0,053465604	0,033020547	0,02236725
2700	0,053301476	0,033431089	0,023503022
2708	0,052993314	0,034617543	0,023875322
2716	0,052548508	0,036288817	0,023756447
2723	0,051987195	0,038396937	0,022755364
2731	0,051352752	0,040600611	0,021572795
2739	0,050763099	0,042609555	0,020216841
2747	0,050333835	0,044034938	0,018997623
2754	0,050020735	0,045138957	0,017735807
2762	0,049821924	0,046005327	0,01665494
2770	0,049775358	0,046402711	0,015995946
2777	0,049832512	0,046275896	0,016499348
2785	0,04983134	0,046089773	0,017666062
2793	0,049833469	0,045712125	0,018943724
2801	0,049985715	0,04478799	0,020170029
2808	0,050403058	0,04292852	0,022054671
2816	0,049833469	0,045712125	0,018943724
2824	0,049985715	0,04478799	0,020170029
2832	0,050403058	0,04292852	0,022054671

ANNEXE 23 : Résumé des bandes spectrales contributives par classe et composante

Classe	Composante	Relation	Top_nombres_ondes_cm-1
AU0	PC1	négativement liée	1743.65, 2515.18, 2522.89, 2530.61, 2507.46, 2538.32, 2546.04, 2499.75, 2553.75, 2492.03
AU0	PC2	négativement liée	732.95, 740.67, 702.09, 725.23, 709.8, 694.37, 1118.71, 570.93, 717.52, 794.67
AU0	PC3	positivement liée	1010.7, 1041.56, 1049.28, 1002.98, 1018.41, 1033.85, 1056.99, 1612.49, 1064.71, 1311.59
CARBAPATITE	PC1	positivement liée	1743.65, 2515.18, 2522.89, 2530.61, 2507.46, 2538.32, 2546.04, 2499.75, 2553.75, 2492.03
CARBAPATITE	PC3	négativement liée	1010.7, 1041.56, 1049.28, 1002.98, 1018.41, 1033.85, 1056.99, 1612.49, 1064.71, 1311.59
C2	PC1	positivement liée	1743.65, 2515.18, 2522.89, 2530.61, 2507.46, 2538.32, 2546.04, 2499.75, 2553.75, 2492.03
C2	PC2	positivement liée	732.95, 740.67, 702.09, 725.23, 709.8, 694.37, 1118.71, 570.93, 717.52, 794.67
C2	PC3	positivement liée	1010.7, 1041.56, 1049.28, 1002.98, 1018.41, 1033.85, 1056.99, 1612.49, 1064.71, 1311.59
C1	PC1	positivement liée	1743.65, 2515.18, 2522.89, 2530.61, 2507.46, 2538.32, 2546.04, 2499.75, 2553.75, 2492.03
C1	PC2	positivement liée	732.95, 740.67, 702.09, 725.23, 709.8, 694.37, 1118.71, 570.93, 717.52, 794.67
C1	PC3	positivement liée	1010.7, 1041.56, 1049.28, 1002.98, 1018.41, 1033.85, 1056.99, 1612.49, 1064.71, 1311.59
URATE	PC1	négativement liée	1743.65, 2515.18, 2522.89, 2530.61, 2507.46, 2538.32, 2546.04, 2499.75, 2553.75, 2492.03
URATE	PC3	négativement liée	1010.7, 1041.56, 1049.28, 1002.98, 1018.41, 1033.85, 1056.99, 1612.49, 1064.71, 1311.59
AU2	PC1	négativement liée	1743.65, 2515.18, 2522.89, 2530.61, 2507.46, 2538.32, 2546.04, 2499.75, 2553.75, 2492.03
AU2	PC2	négativement liée	732.95, 740.67, 702.09, 725.23, 709.8, 694.37, 1118.71, 570.93, 717.52, 794.67
STRUVIT	PC1	négativement liée	1743.65, 2515.18, 2522.89, 2530.61, 2507.46, 2538.32, 2546.04, 2499.75, 2553.75, 2492.03
STRUVIT	PC2	négativement liée	732.95, 740.67, 702.09, 725.23, 709.8, 694.37, 1118.71, 570.93, 717.52, 794.67
STRUVIT	PC3	négativement liée	1010.7, 1041.56, 1049.28, 1002.98, 1018.41, 1033.85, 1056.99, 1612.49, 1064.71, 1311.59

RESUME

Résumé

Les lithiases urinaires représentent une pathologie fréquente, nécessitant une identification précise de leur composition pour une prise en charge étiologique adaptée. Ce travail de thèse évalue l'apport combiné de la spectroscopie infrarouge (FTIR), et de la chimiométrie pour améliorer la caractérisation des calculs urinaires.

L'étude s'est déroulée entre 2022 et 2025, au niveau du laboratoire de chimie analytique de la Faculté de Médecine d'Annaba. Elle a porté sur 105 lithiases urinaires collectés auprès de patients de l'Est algériens, notamment auprès de CHU ANNABA, et analysés selon une approche intégrée. L'examen morphologique a été réalisé selon la classification de Daudon. Les analyses physico-chimiques ont été effectuées par spectroscopie FTIR et analyse thermique (DSC et TG). Des standards purs et des mélanges binaires/ternaires ont été préparés pour valider l'interprétation des signaux spectraux. Les données ont ensuite été soumises à une analyse statistique et chimiométrique, incluant des méthodes univariées (tests de Student, ANOVA) et multivariées (régressions PLS, Ridge, SVR, avec sélection de variables : ANOVA, Lasso, RF, RFE) et ACP.

L'analyse morphologique a permis de distinguer des formes spécifiques associées à certains contextes cliniques. La FTIR a permis une identification fiable des composés majeurs, avec des spectres caractéristiques bien différenciés et a détecté des traces parfois non visibles à l'œil nu, l'analyse thermique a confirmé la présence des phases hydratées ou anhydres. L'analyse statistique univariée a révélé plusieurs associations significatives entre les variables morphologiques, les paramètres cliniques et biologiques. Ces résultats ont permis de confirmer certaines tendances empiriques et d'identifier des facteurs de risque spécifiques. L'analyse multivariée a permis de quantifier les composants lithiasiques avec une très haute précision (R^2 > 0,99 pour plusieurs combinaisons). Le taux de concordance moyen entre prédictions et identifications initiales était de 94,2 %, avec une sensibilité moyenne de 90,3 % et une spécificité de 96 %. En complément, l'analyse en composantes principales (ACP) a validé la capacité des spectres FTIR à différencier les principaux types chimiques de calculs. bien que des chevauchements entre certains composés (ex. : C1 et C2) limitent sa précision quantitative. Ce travail confirme l'intérêt d'associer la chimiométrie à la FTIR dans le diagnostic des lithiases urinaires. Cette approche améliore la précision, l'objectivité et la reproductibilité de l'analyse, avec des perspectives prometteuses pour son automatisation et son intégration en routine clinique.

Mots clés : Lithiases urinaires, Spectroscopie FTIR, Chimiométrie, Analyse morphologique, Analyse thermique.

Abstract

Urinary stones are a common condition that requires accurate identification of their composition to ensure appropriate etiological management. This doctoral work evaluates the combined contribution of infrared spectroscopy (FTIR) and chemometrics to improve the characterization of urinary calculi.

The study was conducted between 2022 and 2025 at the Analytical Chemistry Laboratory of the Faculty of Medicine in Annaba. It focused on 105 urinary stones collected from patients in eastern Algeria, particularly from the Annaba University Hospital (CHU ANNABA), and analyzed using an integrated approach. Morphological analysis was performed according to the Daudon classification. Physicochemical analyses were carried out using FTIR spectroscopy and thermal analysis (DSC and TG). Purs standards and binary/ternary mixtures were prepared to validate the interpretation of spectral signals. The data were then subjected to statistical and chemometric analysis, including univariate methods (Student's t-test, ANOVA) and multivariate regressions (PLS, Ridge, SVR) with variable selection techniques (ANOVA, Lasso, RF, RFE). And PCA

Morphological analysis helped distinguish specific forms associated with particular clinical contexts. FTIR enabled reliable identification of major compounds, with well-differentiated characteristic spectra, and detected traces of minor compounds not always visible macroscopically. Thermal analysis confirmed the presence of hydrated or anhydrous phases. Univariate statistical analysis revealed several significant associations between morphological features and clinical or biological parameters. These findings helped confirm empirical trends and identify specific risk factors. Multivariate analysis enabled highly accurate quantification of lithiasis components ($R^2 > 0.99$ for several models). The average concordance rate between predictions and reference identifications was 94.2%, with an average sensitivity of 90.3% and specificity of 96%. Additionally, principal component analysis (PCA) confirmed the ability of FTIR spectra to differentiate between the main chemical types of stones, although overlaps between certain compounds (e.g., C1 and C2) limit its quantitative accuracy.

This work confirms the value of combining chemometrics with FTIR in the diagnosis of urinary stones. This approach improves the precision, objectivity, and reproducibility of the analysis, with promising prospects for automation and integration into clinical routine.

Keywords: Urinary stones; FTIR Spectroscopy – Chemometrics – Morphological Analysis – Thermal Analysis

ملخص

تمثل الحصيات البولية مرضًا شائعًا يتطلب تحديدًا دقيقًا لتركيبها الكيميائي من أجل ضمان تكفّل سببي مناسب. يقيّم هذا العمل الأكاديمي مساهمة الجمع بين التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) والتحليل الكيميومتري في تحسين توصيف الحصيات البولية.

أُجريت هذه الدراسة بين سنتي 2022 و2025 في مخبر الكيمياء التحليلية بكلية الطب بجامعة عنابة. وقد شملت 105 حصيات بولية جُمعت من مرضى من شرق الجزائر، لا سيما من مستشفى جامعة عنابة(CHU Annaba) ، وتم تحليلها وفق مقاربة متكاملة. أُجري الفحص المورفولوجي وفق تصنيفDaudon ، في حين تم تنفيذ التحاليل الفيزيائية-الكيميائية باستخدام التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) والتحليل الحراري (DSC و TG) كما تم تحضير معايير نقية ومزائج ثنائية وثلاثية للتحقق من صحة تفسير الإشارات الطيفية.
ثم خضعت البيانات لتحليل إحصائي وكيميومتري، يشمل طرقًا أحادية المتغير) مثل اختبارات Student و (ANOVA ومتعددة المتغيرات) نماذج الانحدار PLS و Ridgeو SVR، مع تقنيات اختيار المتغيرات (مثل ANOVA و Lasso و Random Forestو RFE)، بالإضافة إلى تحليل المكونات الرئيسية.(ACP)
سمح التحليل المورفولوجي بالتمييز بين أنماط محددة مرتبطة بسياقات سريرية معينة. مكّن FTIR من تحديد موثوق للمركّبات الرئيسية عبر أطياف مميزة ومتفردة، كما كشف عن آثار لمركّبات غير مرئية بالعين المجردة. وأكد التحليل الحراري وجود مراحل مائية أو لا مائية.

أما التحليل الإحصائي الأحادي، فقد كشف عن وجود علاقات دالة إحصائيًا بين الخصائص المورفولوجية والعوامل السريرية والبيولوجية وقد سمحت هذه النتائج بتأكيد بعض الملاحظات السريرية السابقة وتحديد عوامل خطر محددة.
أظهر التحليل متعدد المتغيرات قدرة عالية على تحديد نسب المركبات داخل الحصيات بدقة كبيرة (مع معاملات تحديد R^2 تفوق 0.99 في عدة حالا). وقد بلغ معدل التوافق بين التنبؤات والنتائج المرجعية 94.2%، مع حساسية متوسطة بلغت 90.3% ونوعية (خصوصية) وصلت إلى 96 %وبالإضافة إلى ذلك، أكد تحليل المكونات الرئيسية (ACP) قدرة أطياف FTIRعلى التمييز بين الأنواع الكيميائية الرئيسية للحصيات، رغم بعض التداخلات بين مركّبات معينة مثل (C1 و C2) مما يحد من دقته الكمية.

تؤكد هذه الدراسة أهمية دمج التحليل الكيميومتري مع التحليل الطيفي FTIR في تشخيص الحصيات البولية، إذ تُحسّن هذه المقاربة من دقة التحليل وموضوعيته وقابليته للتكرار، كما تفتح آفاقًا واعدة لأتمتة التشخيص ودمجه في الممارسة السريرية اليومية.

الكلمات المفتاحية: : الحصيات البولية، التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) - الكيمياء الكيمومترية – التحليل المورفولوجي – التحليل الحراري.

RESUME

Les lithiases urinaires représentent une pathologie fréquente, nécessitant une identification précise de leur composition pour une prise en charge étiologique adaptée. Ce travail de thèse évalue l'apport combiné de la spectroscopie infrarouge (FTIR), et de la chimiométrie pour améliorer la caractérisation des calculs urinaires.

L'étude s'est déroulée entre 2022 et 2025, au niveau du laboratoire de chimie analytique de la Faculté de Médecine d'Annaba. Elle a porté sur 105 lithiases urinaires collectés auprès de patients de l'Est algériens, notamment auprès de CHU ANNABA, et analysés selon une approche intégrée. L'examen morphologique a été réalisé selon la classification de Daudon. Les analyses physico-chimiques ont été effectuées par spectroscopie FTIR et analyse thermique (DSC et TG). Des standards purs et des mélanges binaires/ternaires ont été préparés pour valider l'interprétation des signaux spectraux. Les données ont ensuite été soumises à une analyse statistique et chimiométrique, incluant des méthodes univariées (tests de Student, ANOVA) et multivariées (régressions PLS, Ridge, SVR, avec sélection de variables : ANOVA, Lasso, RF, RFE).

L'analyse morphologique a permis de distinguer des formes spécifiques associées à certains contextes cliniques. La FTIR a permis une identification fiable des composés majeurs, avec des spectres caractéristiques bien différenciés et a détecté des traces parfois non visibles à l'œil nu, l'analyse thermique a confirmé la présence des phases hydratées ou anhydres. L'analyse statistique univariée a révélé plusieurs associations significatives entre les variables morphologiques, les paramètres cliniques et biologiques. Ces résultats ont permis de confirmer certaines tendances empiriques et d'identifier des facteurs de risque spécifiques. L'analyse multivariée a permis de quantifier les composants lithiasiques avec une très haute précision ($R^2 > 0,99$ pour plusieurs combinaisons). Le taux de concordance moyen entre prédictions et identifications initiales était de 94,2 %, avec une sensibilité moyenne de 90,3 % et une spécificité de 96 %. L'analyse en composantes principales (ACP) a validé la capacité des spectres FTIR à différencier les principaux types chimiques de calculs. bien que des chevauchements entre certains composés (ex. : C1 et C2) limitent sa précision quantitative.

Ce travail confirme l'intérêt d'associer la chimiométrie à la FTIR dans le diagnostic des lithiases urinaires. Cette approche améliore la précision, l'objectivité et la reproductibilité de l'analyse, avec des perspectives prometteuses pour son automatisation et son intégration en routine clinique.

Mots clés : Lithiases urinaires, Spectroscopie FTIR, Chimiométrie, Analyse morphologique, Analyse thermique.