

République Algérienne Démocratique et Populaire  
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département d'Hydraulique

Annaba 2016-2017

## THESE

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT EN-SCIENCES

# RECHERCHE SUR LES METHODES ET TECHNIQUES APPLIQUEES AU SECHAGE DES BOUES DES *STEP*

Spécialité : Hydraulique

Par  
ALKANEJ Youssef

Devant le jury

Président :	Mr. Djemili Lakhdar	Professeur	Univ. Badji Mokhtar, Annaba
Rapporteur :	Mr. Hammar Yahia	Professeur	Univ. Badji Mokhtar, Annaba
Examineur :	Mr. Houichi Larbi	Professeur	Univ. Hadji Lakhdr, Batna
Examineur :	Mr. Djebbar Yacine	Professeur	Univ. Med. Cherif Messaadia , Souk Ahras
Examineur :	Mr. Boutaoutaou Djamel	Professeur	Univ. Ouergla
Examineur :	Mr. Nafaa Keblouti	M.C.A	Univ. Badji Mokhtar, Annaba

## **REMERCIEMENTS :**

Afin que cette thèse atteigne sa finalité et voit le jour, le concours de plusieurs personnes et institutions a été nécessaire, qui pour une supervision académique, qui pour un soutien et une aide afin d'aplanir les soucis administratifs rencontrés durant sa réalisation.

Pour cela je tiens à remercier :

**Mr Yahia Hammar et Mahmoud Hadid**, Directeurs de mémoire, pour m'avoir encadré, pour m'avoir fait partager leurs connaissances scientifiques et pour m'avoir prodigué leurs conseils avisés, souvent avec tact et humour.

**Mr Nafaa K.**, Pour qui mes remerciements les plus sincères et dévoués restent toutefois insuffisants en comparaison du travail titanesque qu'il a fait pour moi et de son attention bienveillante à mon égard ; car n'eussent été ses précieux conseils je n'aurais jamais pu venir à bout de ce travail.

**Mr Amarchi H.**, Chef du département d'hydraulique, pour son aide précieuse et ses conseils.

**Mr et Mme Kherici**. Auxquels je dois mon diplôme du fait que c'est grâce à eux que j'ai poursuivi mes études dans cette filière.

**Mr DLIMI**, Auquel vont ma reconnaissance et mes remerciements les plus sincères ainsi qu'à toute l'équipe du laboratoire universitaire du traitement des eaux usées.

Du département d'hydraulique, et spécialement **Mr Djmili**, pour les efforts fournis durant mon cursus universitaire.

**Mme Zahia secrétaire du département de L'hydraulique** Pour sa gentillesse et son efficacité.

**Toute l'équipe de la société des ciments de Hadjar-soud (S.C.H-S)**. Pour son aide précieuse sur le plan pratique de ce travail.

**La Direction de l'hydraulique de la wilaya de Souk-Ahras**, pour son aide et son soutien.

**La Station d'épuration des eaux usées de la wilaya de Souk-Ahras**, son directeur ainsi que les employés pour tous leurs efforts conjugués pour leur aidé à mener à bien cette tâche.

**L'ONA de la wilaya de Souk-Ahras**, Tout le staff dirigeant et personnel.

**La société des ciments de Hadjar-Soud**, son directeur ainsi que les employés pour tous leurs efforts conjugués pour leur aidé à mener à bien cette tâche.

**SER PIAL (filiale ASMIDAL)**, Tous ceux qui m'ont aidé, et plus spécialement Mr FERAG

**A vous tous, UN GRAND MERCI**

## Résumé :

Cette thèse présente les résultats de deux ensembles d'essais expérimentaux complémentaires, il est en fait, consacré à une approche expérimentale déclinant un objectif de développement durable du domaine éco environnemental à contexte méditerranéen :

Le premier protocole est une application visant par des techniques connexes, la réduction du temps de séchage des boues prélevées d'une part à la sortie de l'épaississeur et d'autre part, dans un des lits de séchage des STEP de la ville Souk Ahras .

Cette méthode préconise selon, son principe cardinal, la recherche du temps minimal de séchage obtenu par le meilleur pourcentage de mélange de la boue aux différents déchets de la cimenterie.

Les principaux résultats sont ci après exposés :

- 1- Pour des pourcentages de mélanges variant de 12,5 et 100% de la farine de calcaire rebutée (FCR) et/ou farine de briques réfractaires à base de magnésie (FBRM) issues des fourneaux de la cimenterie de HadjarEssoud ( Nord est algérien).
- 2- Pour des pourcentages de mélange variant de 2.5 à 20% de la sciure de bois d'emballage finement broyée (ScBFB).

Le protocole expérimental mis en œuvre, a montré que les mélanges à 25% de FCR et FBRM, et à 2.5% , 5% de ScBFB , ont permis d'enregistrer :

- pour les siccités de boue de 0 % et 20%, en saison sèche (mois d'août, température moyenne 34°C), un temps de séchage estimé globalement à 1,5 jour pour la fumure composite FCR et FBRM et 4 jour pour la ScBFB ;
- pour la siccité de boue de 0 % et 30%, en saison humide (mois de décembre, température moyenne 16°C), le temps de séchage est sensiblement de 4 à 5 jours pour la FCR et la FBRM et de 7 à 8 jours pour la ScBFB ; .

L'essentiel des résultats montre clairement que, pour un mélange « boue-farines » de 25%, a permis la réduction optimale du volume annuel des boues dont la siccité a atteint 95 %, leur poids initial est ainsi passé de 400g à 17 g.

Le deuxième protocole a porté sur la valorisation conjuguée de l'eau usée épurée aux fumures d'origines diverses constituées notamment du mélange de la boues avec la FCR et boues avec la FBRM , de la boue sèche, de fumiers de ferme (fumier de bovin et ovin ) et d'engrais de synthèse de composition 15, 15, 15 .

A cet effet le champ expérimental a été divisé en deux lots constitués chacun de 8 carrés de 2.5 m<sup>2</sup> de surface. Chacun des carrés a reçu un type de fumure parmi celles décrites plus haut. Les deux lots ont été irrigué l'un à l'eau potable, l'autre à l'au usée épurée.

L'expérimentation s'est effectuée sur la culture de pomme de terre Solonum Tuberosum variété "SAMBA" en sol sablo-argilo-limoneux. Le meilleur rendement de 26 T/ha, a été enregistré pour le cas de la fumure composite : "B. A. STEP/R.F.C.C.". Globalement les rendements moyens sont de 19 T/ha dans le lot irrigué à l'eau usée épurée et de 6 T/ha dans le lot arrosé à l'eau potable.

Au plan éco-environnemental, les boues des STEP peuvent pallier à l'usage des engrais de synthèse dont les dépenses peuvent atteindre les 20% du coût de production des cultures notamment celui de la pomme de terre.

**Mots clés :** STEP – Boues- FCR- FBRM- Eau potable - Eau usée - Pomme de terre

## Summary:

This thesis presents the results of two sets of experimental tests, it is in fact devoted to an experimental approach declining an objective of sustainable development of eco e méditerranien environmental field.

The first set is an application designed by combined techniques, the reduction of the pre sludge drying time raised a hand to the output of the thickener, and the other, in a STEP drying beds of Souk Ahras city.

This method advocated by its cardinal principle, the search for minimal drying time obtained by the best percentages of mixing the mud.

The main results are exposed below:

- 1- For percentages of mixtures ranging from 12.5 to 100% of limestone flour scrap (FCR) and / or flour refractory bricks based on magnesia (FBRM) from the furnaces of cement HadjarEssoud (North East Algeria "
- 2- For percentages of mixture varying from 2.5 to 20% of the packaging sawdust finely ground (ScBFB).

The experimental protocol used, showed that blends 25% RCF and FBRM, and 2.5%, 5% ScBFB, allowed to record:

- 0% for sludge solids contents and 20% in the dry season (August, average temperature 34 ° C), a globally estimated drying time to 1.5 days for the FCR and composite manure FBRM and 4 days for ScBFB;
- for mud dryness of 0% and 30%, in the wet season (December, average temperature 16 ° C), the drying time significantly is 4 to 5 days for the FCR and FBRM and 7 to 8 days for ScBFB;.

Most of the results makes it clear that for a mixture "mud-flour" 25%, allowed optimal reduction of the annual volume of sludge solids contents which reached 95% and their body weight increased from 400 g to 17 g.

The second protocol covered the combined valuation of used purified water to various origins manure constituted including mixtures with sludge and sludge with FBRM FCR, dry mud, farm manures (sheep and cattle manure) and composition of synthetic fertilizer 15, 15, 15

For this purpose the experimental field was divided into two lots each consisting of 8 square of 2.5 m<sup>2</sup> of surface of each square scored a type of manure from those described above. Both batches were irrigated one to drinking water, the other in the purified waste.

The experiment is performed on the potato crop *Solanum Tuberosum* variety "SAMBA" in sandy clay loam soil. The best yield of 26 t / ha was recorded in the case of composite fertilizer: "B. A. STEP / R.F.C.C.". Globally, the average renderings are of 19 t / ha in the lot irrigated with purified waste water and 6 t / ha in the lot watered with potable water.

In the environmental plan STEP sludges can compensate for the use of synthetic fertilizers while expenses can reach 20 cost of crop production including that of the potato salad MA bell.

In the eco-environmental plan, STEP sludge can compensate for the use of synthetic fertilizers which expenses can reach 20% of the cost of crop production including that of the potato.

**Keywords:** STEP- Sludge- FCR- FBRM- Drinking water- Treated wastewater- Potato

## ملخص

هذه الأطروحة تعرض نتائج تجربتين تم إعدادها في سياق التنمية المستدامة وهذا بإتباع المنهج التجريبي مركزين على التطوير المستدام للمحيط المتوسطي ( البحر الأبيض المتوسط) التجربة الأولى عبارة عن تطبيق يهدف إلى تخفيض وتقليص زمن التجفيف للحمأة الآتية من مخرج الهتخن ، ومن جهة أخرى في أحد أسرة التجفيف لمحطة تصفية مياه الصرف الصحي بمدينة سوق أهراس . هذه المنهجية تعتمد بالدرجة الأولى على البحث عن الزمن الأقل للتجفيف المتحصل عليه من خلال أفضل النسب المئوية الممزوجة مع الحمأة . أهم النتائج يمكن حصرها في :

1 - بالنسبة للنسب المئوية المتزاوجة بـ 12.5 % و 100 % من الطحين الأسمنتي ( fcr ) و/ أو الطحين الخاص بـ briques réfractaires المركز على المنغنيز ( fbrm ) المنحدر من فرن مصنع الاسمنت لحجر السود ( شرق الجزائر )

2 - بالنسبة للنسب المتزاوجة ما بين 2.5 و 20 % لنشارة الخشب المسحوق ناعما .

إن البروتوكول التجريبي المعتمد بين أن المزيج 25% من ( fcr و fbrm ) و 2.5% - 5 % من ( scbfb ) سمحوا بتسجيل مايلي:

\* بالنسبة لجفاف الحمأة 0% و 20% في الفصل الجاف ( شهر أوت ، درجة حرارة متوسطة 34 ) زمن التجفيف مقدر بشكل عام بـ 1.5 يوم بالنسبة للسماد العضوي fcr - fbrm بالنسبة للحمأة 0% و 30% في الفصل الرطب ( ديسمبر ، درجة حرارة متوسطة 16 ) زمن التجفيف قدر بـ 4-5 أيام بالنسبة لـ fcr و 7-8 fbrm و 4 أيام بالنسبة لـ scbfb

يتضح من خلال النتائج أن مزج الحمأة مع الطحين بـ 25% سمح بتخفيض مهم من الحجم السنوي للحمأة بحيث أن كمية المياه الجافة وصلت إلى 95% كذلك وزن انخفض من 400 إلى 17 غرام

المخطط الثاني يبين تسميد التربة بأسمدة مختلفة وريها بمياه الصرف الصحي و هذه الأسمدة هي الحمأة الجافة ، الحمأة ممزوجة مع الطحين الكلسي ، الحمأة ممزوجة مع طحين الحجر المركب من المنغنيز ، الحمأة مع نشارة الخشب . أسمدة المزارع ( أغنام و بقر ) ، الأسمدة الكيميائية ذات التركيب

لهذا الغرض فإن المجال التجريبي تم تقسيمه إلى قسمين وهما عبارة عن قطعتين لكل قطعة 8 مربعات مساحة كل مربع 2.5 متر مربع وكلهم حصلوا على أنواع من السماد التي ذكرناها سابقا علما أن هاتين القطعتين تم سقيهما , الأولى بمياه الشرب وثانيا بمياه الصرف الصحي المصفاة.

كل هذه الخلطات تمت المقارنة بينهما بشكل فردي (مقارنة في المردود ) علما أن التجريب قام على زراعة البطاطا نوع سامبا والتي زرعت في ارض ذات تركيبة ترابية تحتوي على (رمل - طين - غروي).

أفضل مردود هو 26 طن / الهكتار سجلت على مربع التجربة المرتبطة بالاستعمال المتزامن للمياه المصفاة ذات المركب . "B. A. STEP/R.F.C.C." بشكل عام فإن المردود المتوسط بلغ 19 طن / هكتار في القطعة المروية بمياه الصرف الصحي ، و 6 طن / هكتار في القطعة المروية بمياه الشرب . هذا التباين المقدر بـ 28 % يوضح الأثر الأساسي للمواد الموجودة في مياه الصرف الصحي المصفاة . من الناحية الاقتصادية والبيئية فإن الحمأة لمحطة الصرف الصحي يمكن أن ترافق استخدام الأسمدة المركبة حيث تخفض من النفقات بنسبة 20 % من تكلفة الإنتاج الزراعي خاصة محصول البطاطا.

**كلمات البحث:** محطة معالجة المياه الصرف - الطحين الأسمنتي - الطحين المركز على المنغنيز - مياه الشرب - مياه الصرف الصحي المعالجة - البطاطا

## **Objectif :**

Dans le monde arabe, beaucoup d'usine de ciment rejettent une énorme quantité de déchets impactant négativement l'environnement. L'on a pris comme exemple l'usine de Hdjar-Soud située dans la wilaya de Skidda à l'est Algérien. Cette usine rejette d'importantes quantités de farine de ciment, briques réfractaires et le bois (sciure de bois) qu'on évalue respectivement à 100 milles tonnes/an, 120 tonnes/an et 5 tonnes/an. (Source société des ciments d'Hadjar-Soud2012)

L'objectif de ce travail est de minimiser l'impacte de ces déchets sur l'environnement d'une part et d'autre part d'utiliser la farine de ciment, farine de briques réfractaires à base de magnésie et le bois (sciure de bois) comme produit de séchage. L'on s'attachera à mesurer le plus court temps de séchage naturel, induit par les différents mélanges de la boue aux déchets sus cités. Deux échantillons sont ainsi étudiés, l'un prélevé en période chaude « mois d'Aout », le deuxième en période froide « mois de Décembre».

L'autre objectif est une proactive qui impacterait avantageusement le développement durable par une gestion intégrée éco-environnementale qu'offrirait la valorisation de ces différents mélanges comparés aux fumures classiques de synthèse et organiques de ferme.

Dans cette partie, l'on exposera et interprétera les résultats d'un protocole expérimental d'essais sur une culture de pomme de terre pratiquée sur sol alluvionnaire sablo-argilo-limoneux de la vallée de la moyenne Medjerda, localisé dans l'enceinte de la STEP de la ville de Souk Ahras.

## **Problématique :**

Le séchage des boues est une opération unitaire consistant à éliminer totalement ou partiellement, par apport d'énergie thermique, un liquide imprégnant un matériau ; il permet par conséquent de réduire substantiellement la masse et le volume des produits, facilitant ainsi leur stockage, manutention et transport. Le séchage assure en outre la stabilisation des boues et permet donc leur transformation en donnant une texture générant une fonctionnalité particulière (Matières sèche des boues dont l'usage en épandage procure notamment un avantage fort recherché en agriculture).

Le long temps de séjour dans le système de séchage des boues constitue une contrainte dans la gestion technique et éco environnementale des STEP. Ce temps de séchage reste un facteur limitant pour une gestion conforme aux règles environnementales.

Cette problématique déclinaire une recherche innovatrice de techniques complémentaires appropriées pour réduire ces délais de séchage des boues eu égard aux procédés classiques utilisés dans les systèmes d'épuration intensifs.

Le choix d'une technologie de séchage résulte d'un compromis technique et économique, il dépend de plusieurs critères tels la structure du produit humide, l'état du matériau dans la filière de séchage, le mode de fonctionnement du séchage et le temps de séjour ....etc.

Dans cette perspective sont présentés des résultats d'un ensemble d'essais de séchages des boues mélangées à différents pourcentages de (12.5 à 100% de FC et FBRFB ) et (2.5 % à 5% de ScBFB )- avec les matériaux naturels : farine de ciment de calcaire (FCC), farine de briques réfractaires de cimenterie (FBRFB), sciure de bois finement broyée (ScBFB).

Ces opérations de séchage sont appliquées aux boues de la STEP de la ville de Souk-Ahras qui produisait en 2012 quelques 23000 t/an stockées sur une aire de 8712m<sup>2</sup>.

Le stockage des boues dans les STEP constitue en outre, un autre facteur contraignant de la gestion aussi important que le long temps de séchage sus rappelé.

L'utilisation des boues d'épuration dans le domaine surtout agricole n'est pas, par réticence des agriculteurs algériens, coutumière; ceci engendre le stockage d'importants volumes de ce déchet des STEP, nécessitant alors de grande superficie d'aire de dépôt durant de longues périodes. Cette situation est fort contraignante pour la gestion des boues

dans les STEP .Il serait recommande aux pouvoirs publics d'initier et encourager les agriculteurs par les moyens de vulgarisation adéquats visant les pratiques d'épandage des boues.

C'est en fait l'aspect éco environnemental qui constituerait le support de la politique agro économique qu'il faudrait prônée, eu égard à l'intérêt socio-économique génèrerait l'usage des boues en agriculture. Cette pratique permettrait à terme, de réduire sensiblement, les volumes et les aires de stockage des boues. Cette

nouvelle approche de la gestion des boues des STEP tendrait à assurer une réduction substantielle des dépenses relatives à l'utilisation des engrais de synthèses couteux et très polluants.

---

## Liste des figures

---

		<b>Page</b>
<b>Figure N° 1</b>	Formation des boues	7
<b>Figure N° 2</b>	Schéma simplifié d'un procédé par boues activée	9
<b>Figure N° 3</b>	Épaississement	10
<b>Figure N° 4</b>	Épaississement des boues par épaisseur	11
<b>Figure N° 5</b>	Épaississement des boues par flottation	11
<b>Figure N° 6</b>	Le procédé filtre bande	14
<b>Figure N° 7</b>	Le procédé Filtre presse	15
<b>Figure N° 8</b>	Filtre presse à membrane	16
<b>Figure N° 9</b>	Schéma d'une filière de traitement par filtre presse	17
<b>Figure N° 10</b>	Lits de séchages (non plantés)	18
<b>Figure N° 11</b>	Lits de séchages plantés de roseaux	19
<b>Figure N° 12</b>	Schéma d'une filière complète de séchage solaire sous serre	20
<b>Figure N° 13</b>	le procédé de Centrifugeuse	22
<b>Figure N° 14</b>	Séchoir à palettes Naratherm .	24
<b>Figure N° 15</b>	Palettes du séchoir à pales.	24
<b>Figure N° 16</b>	Séchoir à couches minces horizontales.	25
<b>Figure N° 17</b>	Séchoir Swir IFluidizer	26
<b>Figure N° 18</b>	Les principaux types de boues issues des sous produits biologiques stabilisés	31
<b>Figure N° 19</b>	Image satellite de la station d'épuration des eaux usées Souk Ahras	34
<b>Figure N° 20</b>	Situation géographique	34
<b>Figure N° 21</b>	Bassin d'emménagement	35
<b>Figure N° 22</b>	Dégrillages grossiers	37

<b>Figure N° 23</b>	Traitement biologique	38
<b>Figure N° 24</b>	Décantation secondaire	38
<b>Figure N° 25</b>	Epaississement des boues	39
<b>Figure N° 26</b>	Lits de séchage des boues	40
<b>Figure N° 27</b>	Boîtes en plastique	51
<b>Figure N° 28</b>	Thermomètre	51
<b>Figure N° 28A</b>	Balance électronique	52
<b>Figure N° 29</b>	Mélanges de boues aux déchets de FC et FBRM	53
<b>Figure N° 30</b>	Evolution du temps de séchage en fonction du pourcentage du mélange (boue_ farine de ciment): siccité 0% ; période hiver et été	57
<b>Figure N° 31</b>	Evolution du temps de séchage en fonction du pourcentage boue déchets de briques réfractaires finement broyées : siccité 0% en période hiver et été	57
<b>Figure N° 32</b>	Variation du temps de séchage en fonction du pourcentage du mélange boue - farine de ciment: siccité 20% période d'été et siccité 30% période hiver	58
<b>Figure N° 33</b>	Variation du temps de séchage en fonction du pourcentage du mélange de boue avec la farine de briques réfractaires magnésiennes FBRM de siccité 20 et 30%	59
<b>Figure N° 34</b>	Variation du temps de séchage en fonction du pourcentage du mélange de ScBFB avec boue de siccité 0% en période d'hiver et d'été	60
<b>Figure N° 35</b>	Variation du temps de séchage en fonction du pourcentage du mélange de ScBFB avec boue de siccité 30% en hiver et 20 % en été	60
<b>Figure N° 36</b>	Localisation géographique et caractéristiques de la zone d'étude	89
<b>Figure N° 37</b>	Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen de la région de Souk-Ahras (Période de 1986-2004)	90
<b>Figure N° 38</b>	méthodes du cercle pour prélèvement d'échantillons de sol	91
<b>Figure N° 39</b>	Sonde de prélèvements d'échantillon	93

<b>Figure N° 40</b>	Localisation du terrain d'essai dans l'enceinte de la STEP de la ville de Souk Ahras	95
<b>Figure N° 41</b>	Assiette du site expérimental en 16 carrés de 2.5 m <sup>2</sup> chacun	95
<b>Figure N° 42</b>	Disposition des lots et carrés d'essais expérimentaux	96
<b>Figure N° 43</b>	préparation du sol	96
<b>Figure N° 44</b>	Type de engrais (Ovin, Bovin, 15, 15,15)	97
<b>Figure N° 45</b>	Schéma de principe d'un carré d'essai	98
<b>Figure N° 46</b>	Teneurs moyennes des paramètres physico-chimiques des carrés du lot irrigué à l'eau potable et à l'eau usée épurée	101
<b>Figure N° 47</b>	Potentiel hydrogène (pH) et Conductivité moyens du sol des lots irrigués à l'eau potable et à l'eau usée épurée	101
<b>Figure N° 48</b>	Plants pomme de terre irriguée à l'E UE	102
<b>Figure N° 49</b>	Plants pomme de terre irrigué à l'E.P	103
<b>Figure N° 50</b>	Rendements de la pomme de terre dans les lots irrigués à l'eau potable et à l'eau usée épurée	103
<b>Figure N° 51</b>	ETM dans le Sol du site et Moyenne des ETM des (FC, FBRM , Bs) avant plantation de Pomme de terre	105
<b>Figure N° 52</b>	ETM dans le Sol du site et moyenne des ETM des (FC, FBRM , Bs) après récolte de PdT, lot irrigué à l'EUE	106
<b>Figure N° 53</b>	ETM dans le Sol du site et moyenne des ETM des (FC, FBRM , Bs) après récolte de PdT, lot irrigué à l'E.P	107

---

## Liste de Tableau

---

Tableaux		Page
<b>Tableau N° 1</b>	récapitulatif des étapes de traitement des boues, techniques, avantages et inconvénients, siccités obtenues et types de station adaptée	27
<b>Tableau N° 2</b>	Type des boues de station d'épuration	40
<b>Tableau N° 3</b>	Composition chimique du bois	50
<b>Tableau N° 4</b>	Les déchets de l'usine de ciment de Hadjar-Soud.	51
<b>Tableau N° 5</b>	Dénomination et composition des substrats essayés (FC).	54
<b>Tableau N° 6</b>	Dénomination et composition des substrats essayés de (FBRM)	54
<b>Tableau N° 7</b>	Dénomination et composition des substrats essayés de ( <b>ScBFB</b> )	54
<b>Tableau N° 8</b>	Siccités des boues, déchets de matériaux, période et température d'essai, pourcentage de mélange, temps de séchage	56
<b>Tableau N° 9</b>	Evolution du temps de séchage en fonction du mélange FC et FBRM avec siccité 0% en période d'hiver et d'été	56
<b>Tableau N° 10</b>	Evolution du temps de séchage en fonction du mélange FC et FBRM pour la Siccité de boue de 30% en période d'hiver et 20% en période et d'été.	58
<b>Tableau N° 11</b>	Evolution du temps de séchage en fonction du pourcentage de mélange de la ScBFB avec boue de Siccité 0% en période d'hiver , 30% en période d'hiver et 20% en d'été.	59
<b>Tableau N° 12</b>	Résultats de l'analyse des eaux usées à la sortie de STEP Souk Ahras	65
<b>Tableau N° 13</b>	Résultats de l'analyse des eaux usées des métaux lourds (entrée et sortie de la station d'épuration de Souk Ahras).	65
<b>Tableau N° 14</b>	Normes pour eaux usées.	66

<b>Tableau N° 15</b>	Caractéristiques Les éléments fertilisants dans les boues résiduares	72
<b>Tableau N° 16</b>	Résultats des analyses chimiques des métaux lourds pour les boues de STEP.	72
<b>Tableau N° 17</b>	Limite de qualité des boues admises à l'épandage agricole	72
<b>Tableau N° 18</b>	Flux limites sur 10 années en ETM apportés par les boues (cas général)	72
<b>Tableau N° 19</b>	Echelle de classification du pH de la solution du sol.	74
<b>Tableau N° 20</b>	Classification des sols en fonction de la CE et de la somme des anions	75
<b>Tableau N° 21</b>	Classe d'appréciation pour le phosphore assimilable	78
<b>Tableau N° 22</b>	Teneurs maximales de boues en ETM pour l'épandage dans les sols	85
<b>Tableau N° 23</b>	Teneur de quelques engrais et produits organiques en ETM (Fourchette de variation en g /T de matière sèche)	85
<b>Tableau N° 24</b>	Prix de vente au détail dans quelques localités d'ANNABA –source BEN LAMOUDI)	88
<b>Tableau N° 25</b>	Type et origine de la fumure appliquée à chaque carré des deux lots, Irrigués à l'eau potable et l'eau usée épurée.	98
<b>Tableau N° 26</b>	Caractéristiques physico-chimiques du sol du site.	99
<b>Tableau N° 27</b>	ETM dans le sol du site et moyenne de ETM dans les fumures composites après récolte de pommer de terre (sous irrigation à l'EUE et EP)	105
<b>Tableau N° 28</b>	Formes chimiques des différents ETM dans les sols étudiés, distinction entre forme adsorbée et dissoute associées aux principaux composants du sol	108

---

## Table des matières

---

	<b>Introduction générale</b>	1
	<b>PRIEME PARTIE</b>	
	<b>A New Natural Method for Sludge Drying of Wastewater Treatment Station– Case Study: Algeria</b>	
	<b>CHAPITRE I : Recherches bibliographiques</b>	
	Introduction.	6
<b>I.1</b>	Production des boues	6
<b>I.2</b>	Origine des boues.	8
<b>I.2.1</b>	Le lagunage nature0l ou aéré.	8
<b>I.2.2</b>	Disques biologiques.	8
<b>I.2.3</b>	les lits bactériens.	8
<b>I.2.4</b>	les boues activées.	8
<b>I.3</b>	Procédé de séchage.	9
<b>I.3.1</b>	Le séchage partiel.	9
<b>I.3.1.1</b>	Epaississement.	10
<b>I.3.1.1.1</b>	Epaississement par décantation ou épaissement statique.	11
<b>I.3.1.1.2</b>	Epaississement par flottation	11
<b>I.3.1.1.3</b>	Epaississement par égouttage	12
<b>I.3.1.1.4</b>	Epaississement par centrifugation	12
<b>I.3.1.2</b>	La déshydratation	13
<b>I.3.1.2.1</b>	Déshydratation mécanique : filtration – compression	13

<b>I.3.1.2.1.1</b>	Filtration ;	13
<b>I.3.1.2.1.1 .1</b>	Procédé filtre bande ;	13
<b>I.3.1.2.1.1 .2</b>	Le procédé Filtre presse ;	14
<b>I.3.2</b>	Le séchage total ;	17
<b>I.3.2.1</b>	par voie naturelle.	17
<b>I.3.2.1.1</b>	Lits de séchages (non plantés) ;	17
<b>I.3.2.1.2</b>	Lits de séchages plantés de roseaux ;	18
<b>I.3.2.2</b>	par voie thermique ;	19
<b>I.3.2.2.1</b>	Séchage solaire ;	19
<b>I.3.2.2.1.1</b>	Avantages du séchage solaire .	20
<b>I.3.2.2.1.2</b>	Contraintes du séchage solaire	21
<b>I.3.2.2.2</b>	Le séchage par rayonnement	22
<b>I.3.2.2.3</b>	Séchage par séchoirs	22
<b>I.3.2.2.3.1</b>	Séchoirs développés pour les matériaux pâteux	23
<b>I.3.2.2.3.2</b>	Séchoir à palettes	23
<b>I.3.2.2.3.3</b>	Séchoir à couche minces	25
<b>I.3.2.2.3.4</b>	Séchoir pneumatique compact	26
<b>I.4</b>	La congélation	29
<b>I.5</b>	<i>Stabilisation des boues</i>	29
	Conclusion	32
	<b>CHAPITRE II :Définition et mise en œuvre du protocole expérimental de séchage des boues de STEP</b>	
	Introduction	33
<b>II.1</b>	Localisation	33

<b>II.2</b>	Capacité de traitement des boues	35
<b>II.3</b>	Fonctionnement	36
<b>II.3.1</b>	Prétraitement	36
<b>II.3.2</b>	Traitement biologique	37
<b>II.3.3</b>	Décantation secondaire	38
<b>II.3.4</b>	Traitement des boues	39
<b>II.3.4.a</b>	Epaississement des boues	39
<b>II.3.5</b>	Lits de séchage des boues	39
<b>II.4.</b>	Boues résiduaires	40
<b>II.4.1</b>	Boue prélevée au niveau de l'épaississeur	41
<b>II.4.2</b>	Boue prélevée au niveau des lits de séchage	42
<b>II.5</b>	Présentation de la société des ciments de Hadjar-soud (S.C.H-S)	42
<b>II.5.a</b>	Les principaux moyens de production	43
<b>II.5.1</b>	Procédé de fabrication :(Préparation du cru)	44
<b>II.5.2</b>	Procédé de fabrication : Cuisson(Clinkérisation)	45
<b>II.5.3</b>	Procédé de fabrication : Broyage clinker	46
<b>II.5.4</b>	Procédé de séchage : Atelier de séchage laitier	47
<b>II.5.5</b>	Contrôle de la qualité en cimenterie	48
<b>II.6</b>	Les différents types de déchets naturels utilisés dans les séchages	49
<b>II.6.1</b>	Farine de ciment	49
<b>II.6.2</b>	Brique réfractaire (brique réfractaires magnésienne)	49
<b>II.6.2.1</b>	Four rotatif	49
<b>II.6.2.2</b>	Matériaux	49

<b>II.6.3</b>	Le bois	50
<b>II.6.3.1</b>	Composition chimique du bois	50
<b>II.6.4</b>	Définition des trois déchets de l'usine de ciment Hadjar-soud	51
<b>II.7</b>	Le matériel et procédé de préparation des matériaux pour le séchage	51
<b>II.7.1</b>	Procédé de fabrication des produits utilisés pour le séchage	52
<b>II.7.1.a</b>	Outils et équipement de mesure et de pesées	52
<b>II.7.1.b</b>	Boues de la STEP de Souk-Ahras et différents déchets de la cimenterie de Hadjar-Essoud	52
<b>II.7.1.c</b>	Les conditions expérimentales	53
<b>II.7.2</b>	Procédé de préparation des matériaux pour le séchage	53
<b>II.7.3</b>	Teneur en matières sèches ou siccité (MS)	54
<b>II.7.4</b>	Mélange et choix des substrats	55
<b>II.8</b>	Analyse et interprétation	55
<b>II.8.1</b>	Analyse d'impact Eco environnemental	61
<b>II.8.2</b>	Contraintes et perspectives du recyclage de FBRM	61
<b>II.8.3</b>	Les possibilités éco- environnementales de la farine de ciment ( FC)	62
	Conclusion	63
	<b>DEUXIEME PARTIE</b>	
	<b>Valorisation conjuguée de l'eau usée épurée à la fumure composite "B.S.STEP/R.F.C.C": Approche expérimentale sur culture de pomme de terre : (Cas d'un sol sablo-argilo-limoneux de la vallée de la Medjerda - Nord Est Algérien)</b>	
	<b>Chapitre III :</b> <b>Caractéristiques et impacts éco environnementaux des déchet des STEP</b>	64

	Introduction	64
<b>III.1</b>	Les eaux usées	65
<b>III.1.1</b>	Origine et qualité des eaux usées :	65
<b>III.1.2</b>	Qualité des eaux usées de la STEP de Souk Ahras :	65
<b>III 1 .3.</b>	Les métaux lourds dans les eaux usées de STEP	65
<b>III.2</b>	Les boues des STEP :	66
<b>III.2.1</b>	Caractéristiques et devenir :	66
<b>III.2.2</b>	La mise en décharge	66
<b>III.2.3</b>	L'incinération	67
<b>III.2.3.1</b>	Les techniques d'incinération des boues	67
<b>III.2.3.2</b>	Les risques sanitaires liés à l'incinération des boues	67
<b>III.2.4</b>	L'épandage des boues:	67
<b>2.4.1</b>	L'épandage sur les sols agricoles :	67
<b>III.2.4.2</b>	Epanages sur sols non agricoles	68
<b>III.2.4.3</b>	Valorisation en matières fertilisantes	69
<b>III.2.5</b>	Impact des boues sur l'environnement	69
<b>III.2.5.1</b>	Réactions physico-chimique	69
<b>III.2.5.2</b>	Réactions biologiques	70
<b>III.2.5.3</b>	Risques sanitaires de l'épandage des boues	71
<b>III.2.6</b>	Composition des boues	71
	<b>Conclusion :</b>	73
	<b>CHAPITRE IV -Caractéristiques physico chimiques du sol</b>	

	<b>Introduction :</b>	74
<b>IV.1</b>	Les paramètres physiques et chimiques	74
<b>IV.1.1</b>	La température C°	74
<b>IV.1.2</b>	Le pH	74
<b>IV.1.3</b>	La conductivité électrique (CE)	75
<b>IV.1.4</b>	La matière organique (MO)	75
<b>IV.1.5</b>	Les éléments chimiques nutritifs et majeurs :	76
<b>IV.1.5.1</b>	Potassium (K) :	76
<b>IV.1.5.2</b>	Calcium (Ca) :	76
<b>IV.1.5.3</b>	Magnésium (Mg) :	77
<b>IV.1.5.4</b>	Sodium (Na):	77
<b>IV.1.5.5</b>	Azote (N)	77
<b>IV.1.5.6</b>	Phosphore (p) :	78
<b>IV.1.6</b>	Métaux lourds dans les sols	79
<b>IV.1.6.1</b>	Généralités	79
<b>IV.1.6.2</b>	Origine de la contamination des sols par les métaux lourds	80
<b>IV.1.6.2.1</b>	Le cadmium :	81
<b>IV.1.6.2.2.</b>	Le plomb :	81
<b>IV.1.6.2.3.</b>	Le zinc :	82
<b>IV.1.6.2.4.</b>	Cuivre (Cu):	83
<b>IV.1.6.2.5</b>	Nickel (Ni) :	83

<b>IV.1.6.2.6.</b>	Chrome Cr	84
<b>IV.1.6.3.</b>	Les normes	84
<b>IV.1.7.</b>	Comparaison des teneurs en ETM de certains engrais et produits utilisés en agriculture.	85
<b>IV.2.</b>	Aperçu socio économique de la valorisation des produits issus des stations d'épuration	87
<b>IV.2.1.</b>	Types d'engrais utilisés :	87
<b>IV.2.2.</b>	Cout des engrais :	88
	<b>Conclusion :</b>	88
	<b>Chapitre V : Etude expérimentale des fumures composites conjuguées à l'eau usée : essais sur pomme de terre en sol alluvial sablo argilo limoneux</b>	
	<b>Introduction :</b>	89
<b>V. 1.</b>	Localisation et caractéristiques climatiques du site expérimental :	89
<b>V. 2.</b>	Méthode et principes de réparation des échantillons :	90
<b>V.3</b>	Méthode de prélèvement d'échantillons de sol :	90
<b>V.3.1</b>	Outils de prélèvement :	91
<b>V.3.2</b>	Matériel adapté :	92
<b>V.3.3</b>	Exécution du prélèvement élémentaire :	92
<b>V.3.4</b>	Utilisation de la tarière :	92
<b>V.3.5.</b>	Utilisation de la sonde :	92
<b>V.3.6.</b>	Utilisation d'une pioche et d'une pelle bêche :	93

<b>V.3.7</b>	Constitution de l'échantillon pour laboratoire :	93
<b>V.4</b>	Méthodes :	94
<b>V.5</b>	Organisation et description du champ expérimental :	94
<b>V.6</b>	Caractéristiques physico-chimiques du sol du site expérimental :	99
<b>V.6.1.</b>	Condition expérimentales et hypothèses d'analyse et d'interprétation des résultats.	100
<b>V.6.1.1</b>	Conditions expérimentales et hypothèses :	100
<b>V.7</b>	Interprétation des résultats pour l'épandage :	100
<b>V.7.1</b>	Analyses et interprétation des rendements	102
<b>V.8</b>	Valorisation éco environnementale des boues de STEP :	104
<b>V.9</b>	Etude des ETM dans le sol	105
<b>V.9.1</b>	Résultats	105
<b>V.9.2</b>	Interprétation	105
<b>V.9.2.1</b>	ETM plomb	105
<b>V.9.2.2</b>	ETM Cadmium	106
<b>V.9.2.2</b>	ETM Zinc	107
	Conclusion	109
	<b>CONCLUSION GENERALE :</b>	110
	<b>Bibliographie</b>	
	<b>Annexe</b>	

# **Introduction**

## **Générale**

### Introduction générale :

La stratégie de tout développement, d'un pays et/ou d'une région, devrait reposer en premier lieu sur « La maîtrise des ressources en eau ». Celles-ci devraient être gérées rationnellement dans un but de développement socio-économique durable. [1].

Avec le développement de l'urbanisation et de l'industrialisation, ainsi que l'évolution des modes de consommation, les rejets d'eaux dites "usées" ont considérablement évolués en quantité et en qualité. Les eaux de pluies, lessivant des surfaces croissantes de bitume et de toitures, se chargent en produits minéraux et organiques et augmentent d'autant le flux polluant à traiter. Lorsque les eaux usées ne sont pas traitées, les capacités d'auto-épuration du milieu récepteur sont alors dépassées, ce qui accentue sa vulnérabilité aux diverses pollutions. [2].

En Algérie à l'horizon 2030, les ressources en eau non conventionnelle (eau usée épurée), atteindront un potentiel estimé, pour un taux d'épuration global de 52%, un volume annuel de 762,6 Hm<sup>3</sup>; ce potentiel d'eau usée épurée, l'irrigation des superficies de 64000 et 1,07million d'hectares respectivement sans et avec stockage à 100% [3] un potentiel de 80,5 millions de T de MS/an. [4].

L'épuration des eaux usées génère d'importants volumes en surplus de boues activées (SAS) [5], dont il faudrait réduire au mieux leur siccité ce qui, compte tenu de leur éventuel usage, devrait offrir un avantage éco environnemental fort recherché.

Qui dit épuration des eaux dit également production de boues pourtant, dans un premier temps, l'objectif de ces stations était essentiellement de garantir le rejet d'une eau de qualité définie en se préoccupant peu des boues produites par les procédés d'épuration. La tendance actuelle est différente car les boues, au même titre que l'eau usée, sont considérées comme un élément qui contribue à l'impact environnemental d'une station d'épuration [6].

Les boues sont des déchets volumineux, hydratés généralement à 95% et 99% [7] ; elles sont constituées en grande partie de matières organiques fermentescibles, et, seraient de ce fait une source de nuisance potentielle.

Dans les procédés de traitement des boues, l'opération de séchage est d'une grande importance, relativement à toutes les opérations unitaires mises en jeu. Bien que le séchage soit généralement la dernière étape du processus industriel, il est souvent appliqué

à un grand nombre de matériaux comme les matériaux pâteux. Ces matériaux présentent une structure collante ou plastique qui rend difficile l'écoulement dans la filière de séchage.

Le séchage des boues, est par conséquent une opération essentielle, pour effectivement obtenir une déshydrations requise permettant leur usage dans les domaines agricole et/ou industriel. A à ce titre faut-il rappeler en accord avec [8], que le séchage, consiste en l'élimination totale ou partielle de l'eau d'un produit humide.

Le séchage a, au début du siècle passé, fait ses premières apparitions dans le domaine des boues industrielles au Japon, aux États-Unis et en Europe [9], il demeure cependant un domaine de recherche universel dont le but est la réutilisation de ces boues dans différents domaines notamment non seulement celui de la production de l'énergie, mais aussi beaucoup plus dans le domaine de l'agriculture.

Dans certains pays quelques solutions qui peuvent être qualifiées de finales pour éliminer les boues d'épuration sont rapportées. Par exemple, au royaume Uni, 67% des boues produites sont épandue sur les terres, 29% sont larguées en mer et 4% incinérées [10]. Le largage en mer représente à la fois un déplacement des problèmes de pollution, et une perte de matériel potentiellement réutilisable, la mise en décharge a les mêmes inconvénients, quant à l'incinération, les coûts du combustible nécessaire remettent en question ce mode d'élimination des boues.

La recherche d'autres méthodes se poursuit actuellement de par le monde, ceci est suscité par la préoccupation des chercheurs, gestionnaires et/ou donneurs d'ordres pour la mise en œuvre de techniques permettant une meilleure gestion par la réduction du volume des boues ; ceci demeure donc un intérêt éco socio environnemental majeur. A cet effet, la technologie connue sous le nom de traitement des boues a, en Europe, été utilisée, depuis la fin des années 1980, pour la déshydratation et la stabilisation des boues [11].

La conception de la filière de traitement des boues est fortement liée à la destination finale de celles-ci (épandage agricole, compostage, mis en décharge, incinération etc.) dans toutes les boues extraites de la filière eau de station de traitement contiennent principalement de l'eau (plus de 97%) et nécessitent donc d'abord d'être concentrées puis déshydratées.

Le taux de déshydratations optimum, la conception et le cout inhérent dépendent de la siccité finale requise pour la filière de valorisation des boues.

Dans ce sens, la valorisation des boues résiduairees par épandage semble le moyen le plus efficace, du point de vue écologique et économique, à savoir que cette pratique vise un

### **Double objectif :**

- ✓ Mettre à profit les capacités biologiques naturelles des sols pour "digérer" les boues et en réintroduire les éléments minéraux dans les cycles naturels d'où,
- ✓ Valorisation des propriétés fertilisantes des boues résiduairees en agriculture.

L'utilisation des boues résiduairees des stations d'épuration urbaines en sylviculture semble à priori, poser moins de problème qu'en agriculture, en effet les risques de toxicités vis-à-vis de l'homme par exemple par passage de métaux lourds dans la chaîne alimentaire n'existent pas.

Les activités humaines génèrent des déchets en quantités de plus en plus élevées, leur

gestion pose de gros contraintes ;de ce fait, il faut trouver les voies et moyens par les recyclages. Les boues résiduairees, au même titre que les eaux usées dont elles dérivent, peuvent être mises à profit dans les régions où la variation climatique du milieu associée au coût de production ne permettent pas toujours d'utiliser les fertilisants de synthèse chimiques pour palier à la l'insuffisance du potentiel de fertilité des sols cultivés [12].

L'irrigation aux eaux usées a contribué à l'amélioration de la fertilité et de la productivité du sol, et du rendement des cultures étudiées. Les résultats des amendements organiques à base de boue résiduairee révèlent une augmentation de la production [13].

La réutilisation des EUE pour l'irrigation reste une bonne alternative pour la réduction des usages abusifs des engrais corolaire de la contamination de la nappe par les fertilisants de synthèse [14].

L'épandage des boues des Stations de l'épuration des eaux usées sur le sol est conditionné par leur valeur agronomique et leur innocuité vis-à-vis du sol et des eaux [15].

La présence de Salmonella dans les premiers gâteaux de boue après le traitement était faible, et absents dans la plupart des cas [17].

Cette étude s'inscrit dans ce cadre a pour objectif de savoir si la réutilisation des eaux usées épurées pour l'irrigation et des boues comme fertilisants en agriculture (cultures maraîchères) ne causerait pas de problèmes pour l'homme et l'environnement [18].

Nous avons déterminé, par comparaison à d'autres substrats, l'influence de leur apport sur les propriétés physiques d'un sol et sur les rendements d'une culture de pomme de terre [19].

Selon la dose appliquée, les boues peuvent couvrir, en partie ou en totalité, les besoins des cultures en azote, en phosphore, en magnésie, calcium et en soufre ou peuvent aussi corriger des carences à l'exception de celle en potassium [20].

Les éléments en traces tels que le cuivre, le zinc, le chrome et le nickel présents dans les boues sont aussi indispensables au développement des végétaux et des animaux [21].

Malgré les coûts croissants de traitement des boues nécessaires à une valorisation agricole, l'épandage reste la filière la plus économe [22].

Malgré les efforts consentis dans le domaine d'épuration des eaux usées en Algérie au cours des vingt dernières années, la situation reste problématique et non maîtrisée en matière de valorisation et du devenir des boues des stations d'épuration (STEP) des eaux usées urbaines.

Chaque station d'épuration a deux chaînes de traitement une chaîne dite «chaîne eau» et une autre dite «chaîne boue». La chaîne boue est différente d'une région du monde à une autre (selon le climat) et d'une station à une autre (selon les procédés du traitement adoptés).

Le traitement des boues dans les pays froids (comme ex URSS, Canada etc.) passe généralement par une digestion des boues avec récupération du gaz méthane ( $CH_4$ ) pour le réchauffement soit des locaux de la station même, soit pour le chauffage central des immeubles d'habitations. Alors que dans les pays chauds (par exemple l'Algérie), le système d'épuration à boue activée, généralement assujéti au séchage total, génère d'importantes quantités de boues qui sont en outre sources potentielles de nuisances, leur traitement nécessite non seulement un assez long temps de séchage et des aires de dépôt conséquentes. Cet aspect « éco socio environnemental » rend évidemment contraignante la gestion spatio- temporelle des boues.

A cet égard la recherche de méthodes naturelles de séchage complétant celles évoquées ci haut dans les références bibliographiques, est dans cette contribution,

entreprise à l'effet d'optimiser ces facteurs de temps et d'espace réservé à la déshydratation et stabilisation des boues.

Dans cette perspective, est traité le cas des boues de la STEP de la ville de Souk-Ahras, produisant en 2012, 23346 t/an de boues mises en dépôt sur une superficie de 8712m<sup>2</sup> de lits de séchage et 17424 m<sup>2</sup> d'aire de dépôt [23].

La réduction du facteur spatiotemporel est conditionnée par un séchage adéquat qui pourrait se réaliser par un mélange à différent, pourcentages de boue de la STEP de la ville de Souk Ahras aux déchets d'origine calcaire : farine de ciment et de briques réfractaires à base de magnésie de la cimenterie de Hadjar Essoud située dans la Wilaya de Skikda située au Nord Est Algérien. Cette usine rejette 80-100 milles t/an de la farine de ciment et 80- 120 t/an de rebut de briques réfractaires déclassées après usage et 3-5 tonnes/an sciure de bois finement broyée.

Dans le système actuel le temps de séjours en situation normale serait dans les lits de séchage de 15 et 45 jours respectivement en période estivale et hivernale.

La station d'épuration des eaux usées de la ville de Souk-Ahras produit des boues activées qui sont connues par leurs richesses en matière organique et par leurs actions améliorantes des propriétés physico-chimiques des sols.

Ce mémoire de thèse est structuré en 5 chapitres :

**Chapitre 1** : Recherches bibliographiques les méthodes des séchages des boues ;

**Chapitre 2** : Une nouvelle méthode naturelle pour séchage des boues d'étude de cas Traitement des eaux usées Station-: Algérie ;

**Chapitre 3** : Caractéristiques et impacts éco environnementaux des déchets des STEP ;

**Chapitre 4** : Caractéristiques physico chimiques du sol ;

**Chapitre 5** : Etude expérimentale des fumures composites conjuguées à l'eau usée et l'eau potable : essais sur pomme de terre en sol alluvial sablo argilo limoneux.

# **Chapitre I**

***Recherches bibliographiques les méthodes***

***des séchages des boues***

## Introduction

Le séchage peut réduire considérablement la masse et le volume des produits, ce qui entraîne de substantielles économies de transport et de stockage. Bien connu depuis l'antiquité, le séchage est encore aujourd'hui largement utilisé dans les industries agroalimentaires pour traiter de grandes quantités de produits de nature très diverse [24].

Le séchage a, au début du siècle passé, fait ses premières apparitions dans le domaine des boues industrielles au Japon, aux États-Unis et en Europe [25].

L'opération de séchage des boues se présente comme préliminaire aux autres traitements tels le compostage, l'incinération ou la mise en décharge. La déshydratation peut être effectuée sur la base de procédés mécaniques classiques, tels que l'évaporation de l'eau, de l'évapotranspiration (ET) et la percolation [26].

### 1. Production des boues

Le traitement des eaux usées en station d'épuration produit une eau épurée, rejetée dans le milieu naturelle et une concentration désigne sous le terme de « boues » ou « boues résiduaires ». Au cours d'une épuration biologique les boues apparaissent généralement à deux niveaux : [27].

A) Les plus grosses particules solides se déposent au fond du décanteur primaire et forment les boues primaires ;

B) Les particules fines dispersées est ces substances dissoutes sont fixées et métabolisées par les bactéries qui se multiplient en présence d'oxygène au cours de l'opération d'aération.

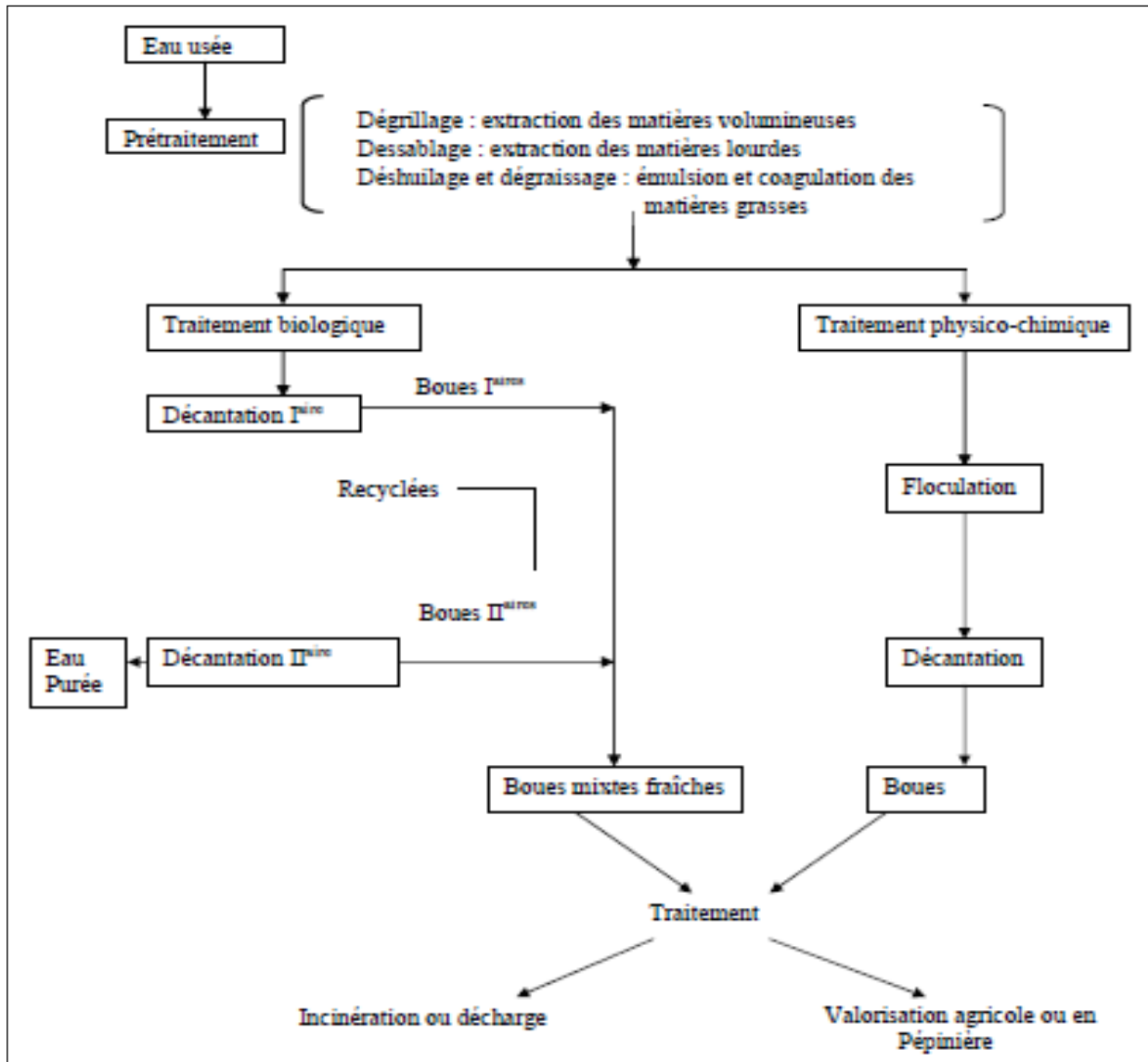


Figure N° 1: Formation des boues [27].

## 2. Origine des boues :

Les boues sont composées de particules solides non retenues par les prétraitements. Elles sont essentiellement composées d'eau (environ 99%), de matières minérales en suspension, de matières organiques non biodégradables et de microorganismes, ces derniers résultant de l'épuration biologique. Parmi les boues, on distingue les boues urbaines et les boues industrielles. Les premières sont produites dans les stations d'épuration traitant des effluents dits « urbains », c'est-à-dire majoritairement des eaux usées d'origine domestique. Les secondes sont issues du traitement d'eaux usées industrielles. Selon l'origine urbaine ou industrielle de la boue et les traitements physico-chimiques, qu'elle a subis, ses caractéristiques et donc son comportement seront différents. Dans ce travail, nous n'exposerons que les boues d'origine urbaine [28].

Les boues peuvent être issues des différentes techniques

### 2.1. Le lagunage naturel ou aéré

### 2.2. Disque biologique

### 2.3. Les lits bactériens :

### 2.4. Les boues activées

Le traitement des boues est défini comme l'ensemble des opérations visant à modifier les caractéristiques des boues en excès afin de rendre leur destination finale fiable et sans nuisance [27].

### 2.4. Les boues activées

Les procédés par boues activées comportent essentiellement une phase de mise en contact de l'eau à épurer avec un floc bactérien en présence d'oxygène suivie par une phase de séparation de ce floc (clarification).

C'est une intensification qui se passe dans le milieu naturel. La différence provient d'une plus grande concentration en micro-organisme donc une demande en oxygène plus importante. De plus pour mettre en suspension la masse bactérienne, une agitation artificielle est nécessaire. Une station de traitement par boues activées comprend dans tous les cas [1] :

- un bassin d'aération dans lequel l'eau à épurer est mise en contact avec la biomasse;
- un dispositif de brassage et d'aération;
- un décanteur (secondaire) dans lequel s'effectuera clarification des eaux et l'épaississement de la biomasse ;

- un dispositif de recyclage qui permet de soutirer les boues en excès au bas du décanteur et d'en renvoyer une partie vers le bassin d'aération.

Les boues en excès sont envoyées vers un épaisseur.

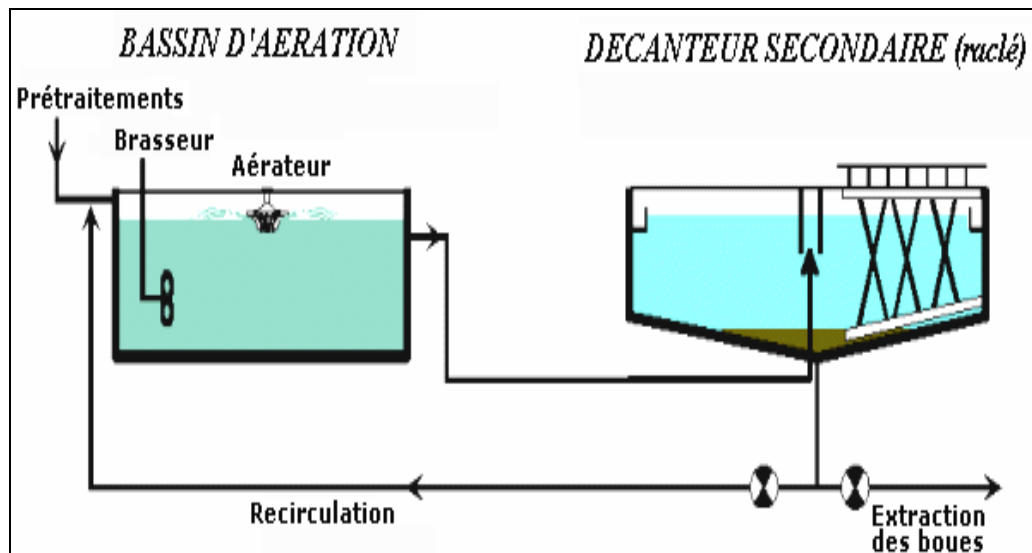


Figure N° 2 : Schéma simplifié d'un procédé par boues activées [6].

Le processus complet de traitement se décompose donc généralement de plusieurs étapes, chacune d'entre elles générant des boues de qualités différentes. On distingue ainsi les traitements: primaire, secondaire et tertiaire.

### 3. Procédé de séchage :

A cet effet, la technologie connue sous le nom de traitement des boues a, en Europe, été utilisée, depuis la fin des années 1980, pour la déshydratation et la stabilisation des boues [26].

Il existe deux grands domaines de méthodes de séchage des boues des STEP :

#### 3.1. Le séchage partiel :

Par contre et historiquement, différentes méthodes des boues issues des l'épaisseur et de la déshydratation, ont concerné ce type de séchage et ont permis à cet effet, une réduction de 50 à 80 % du volume d'eau initial [29, 30, 31, 32, 33,34].

Pour réduire les volumes de boues, différents procédés sont mis en œuvre, comprenant par ordre croissant d'efficacité et de coût, l'épaississement, la déshydratation et le séchage [35].

### 3.1.1. Epaisseur :

L'épaississement (figure 3) vise à augmenter la cécité des boues (teneur en matière sèche) sans pour autant modifier le caractère liquide de la boue. Cet épaississement peut se faire simplement par voie gravitaire dans un concentrateur ou par des moyens mécaniques [36].

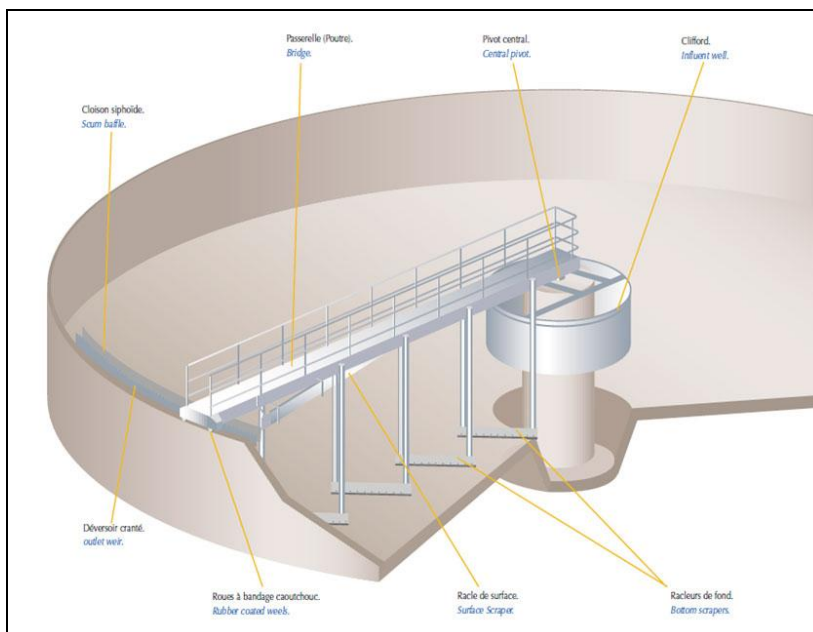


Figure N° 3 : Epaisseur [38].

Nous pouvons constater que :

- La concentration des extractions des différents ouvrages de traitement d'eau fonctionnant en marche continue ou cyclique est faible et dépasse rarement 10 g/l (4 à 10 g/l en eau résiduaire urbaine) ;
- Les ouvrages fonctionnant en chasse périodique donnent des boues plus concentrées mais l'élimination globale des MES entraîne systématiquement une dilution surabondante des fins de purges ;
- Différents moyens sont mis en œuvre pour l'épaississement des boues.

Ces moyens sont de deux ordres :

- épaississement par décantation ou épaississement statique;
- épaississement dynamique : flottation, égouttage, centrifugation [6].

### 3.1.1.1. Epaissement par décantation ou épaissement statique :

L'épaissement se fait par décantation en piston des boues. La décantation est aidée par une herse à mouvement lent qui, en faisant rouler les particules de boues les unes sur les autres, favorise l'écoulement de l'eau interstitielle et l'évacuation des gaz occlus. Le tassement des boues est donc ainsi favorisé [37].

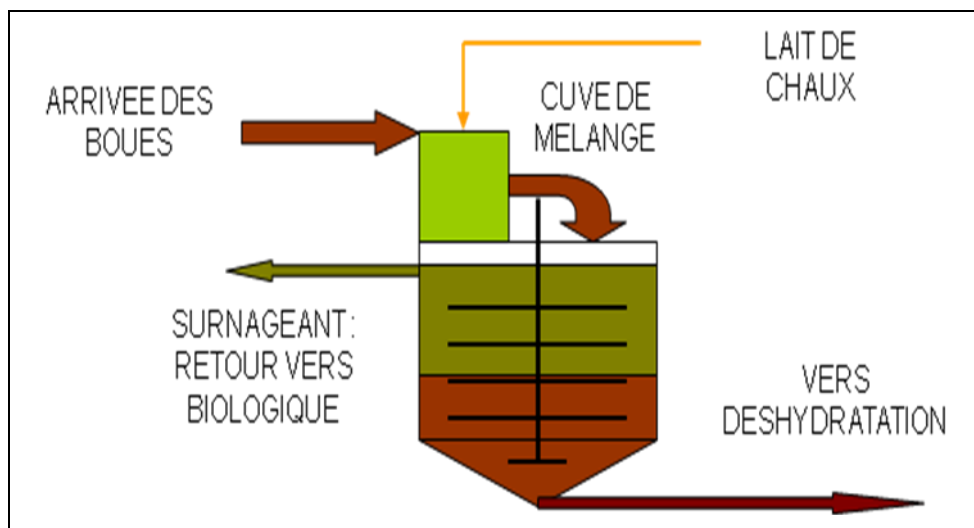


Figure N° 4 : Epaissement des boues par épaisseur [23].

### 3.1.1.2. Epaissement par flottation :

Le Principe consiste à réduire la masse volumique apparente de la phase solide par adsorption ou absorption de bulles gazeuses pour en provoquer l'entraînement vers la surface avec une vitesse ascensionnelle qui, en modèle laminaire, sera donnée par la loi de Stokes. Ce procédé moins utilisé que les précédents [37].

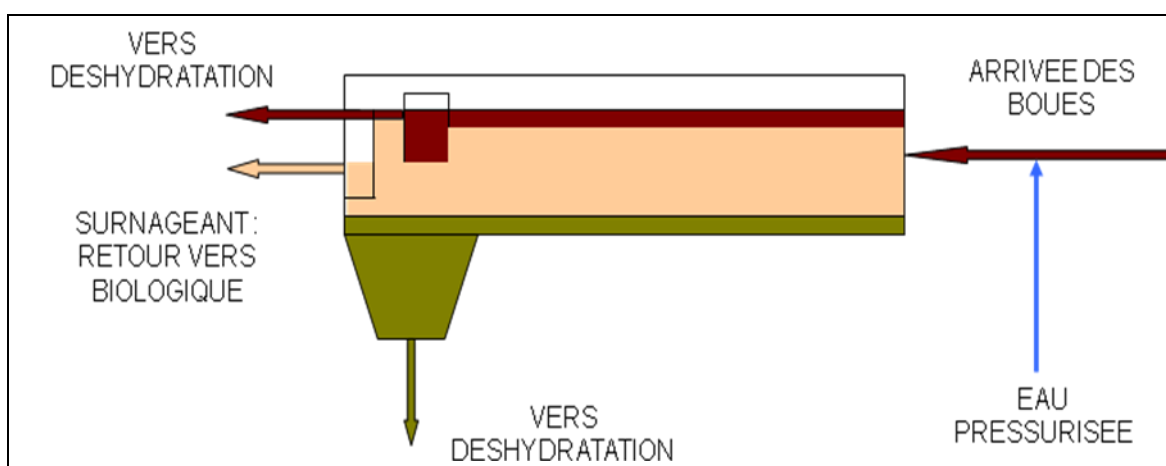


Figure N°5 : Epaissement des boues par flottation [23].

### 3.1.1.3. Epaissement par égouttage :

Différents dispositifs peuvent être utilisés (tambours, poches filtrantes, grilles d'égouttage), mais la grille d'égouttage est l'appareil qui allie à la fois simplicité d'emploi et fiabilité.

Cet appareil à fonctionnement continu est placé directement au refoulement de la pompe d'alimentation en boues fraîches. La boue, préalablement floculée au polymère de synthèse, est épandue sur un champ horizontal de grille fine raclée en permanence par des lames en caoutchouc.

La concentration des boues augmente progressivement en avançant sur le champ de grille, le réglage est optimal lorsque la boue ne contient plus d'eau libre en fin de parcours.

Le débit de la pompe à boue, de l'injection du polymère ainsi que la vitesse de raclage sont réglables. Le lavage de la grille est réalisé de façon cyclique au moyen de pulvérisation d'eau sous pression.

L'apport d'agent de floculation s'effectue à travers un mélangeur statique placé en aval de la pompe à boues. La consommation de polymère est relativement élevée (5 à 8 kg/tonne de MES) mais cette dépense demeure faible sur de petites stations, surtout eu égard aux avantages que présente cet épaissement [37]:

- ◀ **Soutirage direct de boues en excès** peu concentrées depuis la recirculation en boues urbaines ;
- ◀ **Réduction de 2 à 3 fois du volume de stockage des boues** avant leur reprise en agriculture ;
- ◀ **Réduction dans les mêmes proportions du coût de transport des boues.**

### 3.1.1.4. Epaissement par centrifugation

L'épaissement par centrifugation présente les inconvénients d'être lourds en investissement et en coût d'exploitation (consommation d'énergie 150 à 300 kWh/tonne de MES). Par contre, il a l'avantage de n'occasionner que peu de nuisances olfactives (car l'appareil est fermé) et d'être très compact. L'épaissement obtenu est plus important que par flottation. Par ailleurs, sous peine d'avoir des rendements de capture et des débits alimentaires possibles faibles, l'emploi d'un polymère (1 à 2 kg/t MES) est indispensable. Nous risquons aussi en cas de fonctionnement sans polymère d'avoir une classification des boues avec départ de fines. La centrifugation consiste en une décantation accélérée par force centrifuge [6].

### 3.1.2. La déshydratation

La déshydratation qui correspond à une augmentation forte de siccité, modifie l'état physique des boues, celles-ci passant de l'état liquide à l'état pâteux ou solide [35].

Ces procédés permettent de séparer une partie de l'eau de façon à obtenir des boues plus épaisses dans d'un volume plus faible. On dispose de plusieurs techniques mécaniques ou physiques que l'on peut appliquer sur les boues issues des décanteurs mais qu'il est préférable de faire précéder d'un conditionnement chimique ou thermique afin l'améliorer le rendement ou de diminuer le temps de séjour de la boue [38].

#### 3.1.2.1. Déshydratation mécanique « filtration – compression » :

La déshydratation mécanique permet, de façon générale, de séparer mécaniquement les particules solides d'une suspension du fluide porteur, en excluant tout apport annexe (Thermique, électrique / électromagnétique ou chimique).

Parmi les techniques de séparation - liquide – solide (SLS), la filtration – compression consiste à concentrer et déshydrater une suspension à traiter. Elle se compose de deux étapes :

La filtration, gouvernée par les pressions hydrauliques, et la compression qui résulte d'un mouvement de parois ou de membranes provoquant un écrasement du gâteau de filtration et l'évacuation du liquide [39].

##### 3.1.2.1.1. Filtration :

Il s'agit de séparer l'eau des matières solides grâce à un matériau filtrant (sable, textile) par une simple action gravitaire ou par une différence de pression sous pression pour les filtres à bande par exemple ou sous vide dans un tambour rotatif. On obtient ainsi des boues à 30% de matière sèche environ [22].

La filtration peut être menée sous vide ou sous pression. Dans le premier cas, les filtres sont des tambours rotatifs ouverts. Dans le second cas, la filtration peut être menée dans un filtre à bandes ou un filtre à plateaux [6].

Il existe deux procédés principaux,

- 1) Le procédé filtre à bande,
- 2) Le procédé Filtre presse

##### 3.1.2.1.1.1. Procédé filtre bande : [23].

- La boue est déversée entre deux toiles filtrantes mises en rotation et progressivement rapprochées afin d'augmenter la pression de contact permettant d'éliminer l'eau au travers des toiles

- L'utilisation de polymère est nécessaire
- Demande une surveillance accrue du personnel
- Permet d'atteindre des taux de siccité de l'ordre de 20 à 25 %
- Consommation électrique faible
- Utilisé dans les stations de taille moyenne (10.000 à 50.000 EH)

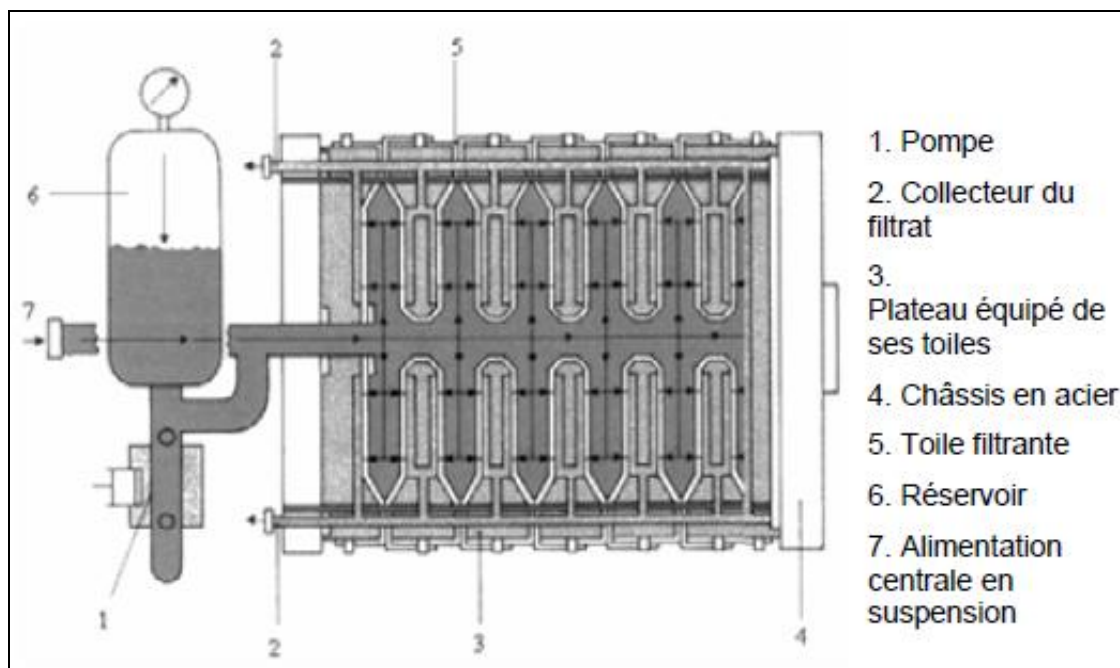


FigureN<sup>0</sup>6 : Le procédé filtre bande [23].

#### 3.1.2.1.1.2. Le procédé Filtre presse :

Un filtre presse est constitué de plateaux verticaux, évidés et recouverts d'une toile filtrante. Ces plateaux sont disposés en batterie et serrés les uns contre les autres par des vérins hydrauliques (Fig. 7).

Les chambres ainsi aménagées entre chaque plateau sont ensuite alimentées avec la suspension prétraitée, par l'intermédiaire d'une pompe haute pression.



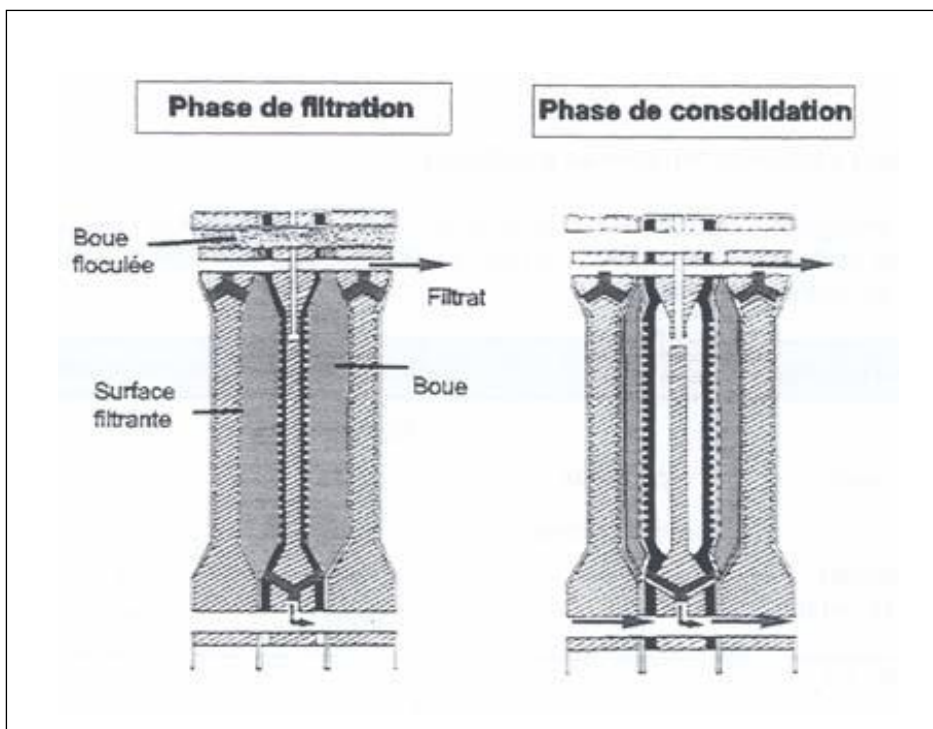
FigureN<sup>0</sup>7 : Le procédé filtre presse [39].

Une fois ces chambres remplies, l'introduction continue de la suspension à déshydrater provoque la montée en pression (jusqu'à 15 bar) à l'intérieur du filtre.

En fin de cycle, lorsque la pression est maximale, les plateaux sont séparés afin d'évacuer les gâteaux formés (phase de débatissage).

L'ensemble de ces phases (serrage, remplissage, filtration, débatissage) constitue la pressée. Le fonctionnement du filtre-presse est donc discontinu. Après un certain nombre de pressées, les toiles filtrantes sont encrassées. On procède alors à une séquence de lavage simultanément.

Cette technologie peut être améliorée en ajoutant une membrane, généralement en plastique, sur une des faces de chaque plateau. Il s'agit ici d'un filtre presse à membrane (Fig.8).



Figure

N°8 :

Filtre presse à membrane [39].

Dans ce cas, la pression de fonctionnement est généralement de 9 bars (ce qui évite d'utiliser une pompe d'alimentation haute pression) pendant la phase de remplissage , puis par injection d'air ou d'eau, on comprime la membrane pour aller jusqu'à 16 bar et le gâteau est comprimé.

L'efficacité de la déshydratation par filtre presse est essentiellement dépendante :

- De l'efficacité du conditionnement préliminaire ;
- De la pression atteinte en fin de pressée ;
- Du degré d'encrassement des toiles ;
- Du type de suspension pressée [39].

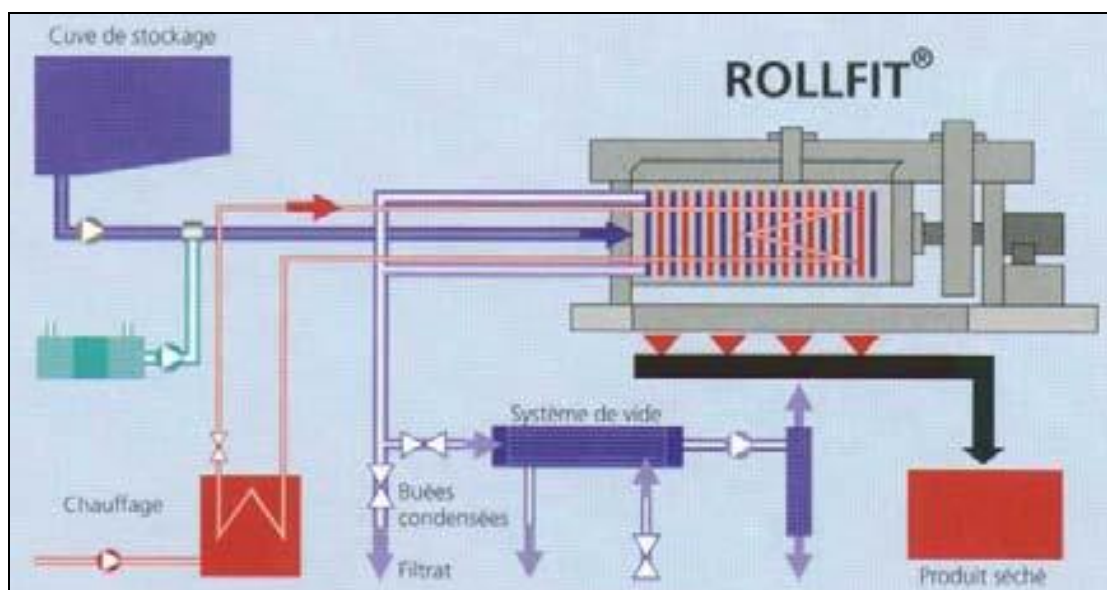


Figure N<sup>o</sup>9 : Schéma d'une filière de traitement par filtre presse [39].

### 3.2. Le séchage total :

Procédure d'élimination totale de l'eau des boues après l'épaississeur, le séchage élimine l'eau en grande partie ou en totalité par évaporation, soit par voie naturelle (lits de séchage), soit par voie thermique.

#### 3.2.1. Par voie naturelle (lits de séchage plantée ou non plantée) :

Cette méthode a fait sa preuve selon les études menées par des auteurs tels que : [40, 41, 42, 33, 43, 44, 26, 45, 46]

##### 3.2.1.1. Lits de séchages (non plantés) :

Le processus de traitement par lit de séchage est un procédé principalement axé sur la séparation des phases solides et liquides afin de réduire le volume des boues et augmenter leur concentration. Il s'agit souvent d'un traitement primaire qui nécessite d'être complété par d'autres procédés. Ce principe est basé sur la sédimentation, l'évaporation et l'infiltration.

Le séchage des boues accéléré par l'évapotranspiration lorsqu'il s'agit de lits plantés, ou par l'énergie solaire voir éolienne pour les lits non plantés. [47].



**Figure N°10 : Lits de séchages (non plantés) [23].**

Les lits de séchage non plantés s'étalent en général sur une grande surface ce qui peut être problématique. L'efficacité du processus résulte dans le choix du type de gravier ou sable constituant le filtre. Il s'agit de combiner divers composants de porosité variée dont les épaisseurs sont différentes en tenant compte des flux hydrauliques devant s'écouler (infiltration) en fonction de la composition des boues, tout en évitant aussi les problèmes de colmatage. . On obtient une siccité de l'ordre de 30% après un temps de séjour de trois semaines mais dépend des conditions météorologiques [48].

Les lits non plantés ont cependant le grand avantage d'être très abordable au niveau financier.

### **3.2.1.2. Lits de séchages plantés de roseaux :**

Cette technique se pratique à l'air libre sur des boues liquides et combine drainage et évapotranspiration. En effet les roseaux de types phragmites plantées sur un massif filtrant constitué de différentes couches de sable de granulométries différentes reposent sur un radier, qu'ils colonisent en développant un tissu complexe de racines (rhizomes) assimilable à un réseau de drainage [49]. On obtient une siccité de l'ordre de 20 à 30% au bout de 10 jours et dépendant des conditions météorologiques.

La filtration des lits se fait par la succession de trois couches filtrantes d'épaisseur et de porosité différentes : du haut vers le bas on a [50] :

- Une couche de sable fin ( $0,3 < \varnothing < 2\text{mm}$ ), épaisseur 15cm, porosité 40,30 ;
- Une couche de gravier fin ( $10 < \varnothing < 15\text{mm}$ ), épaisseur 20cm, porosité 47,73 ;
- Une couche de gravier grossier ( $15 < \varnothing < 25\text{mm}$ ), épaisseur 30cm, porosité 50,00 ;



**Figure N°11** : Lits de séchages plantés de roseaux [50].

### 3.2.2. Par voie thermique :

Dans la filière actuelle de traitement des boues, le séchage thermique est le dernier maillon de la chaîne de séparation de l'eau de la fraction solide. Cette étape de déshydratation peu consommatrice d'énergie est présente dans la plupart des installations. (Etude RECORD n°99-0217/1A2001) « Cette étude visait à compléter les travaux réalisés en 1998 par GDF et cofinancés par l'ADEME, l'Agence de l'eau Seine Normandie et GDF [RES98] ». Parmi les méthodes de séchage par voie thermique on peut citer [51] :

- Le séchage thermique des boues revêt un effet temporaire de stabilisation (par absence d'eau), persistant aussi longtemps que les boues ne sont pas ré humectées.

Permet une élimination quasi-totale de l'eau (siccité d'environ 95%). Les boues obtenues sont pulvérulentes ou en granulés. En raison des coûts énergétiques, ce procédé reste peu utilisé, malgré son intérêt manifeste sur la réduction des volumes à manipuler.

- Le séchage thermique devrait connaître un nouveau développement dans les années à venir car les autres filières de traitement des boues, dont l'incinération, se renchérissent sous l'effet des nouvelles conditions réglementaires et économiques [27].

#### 3.2.2.1. Séchage solaire :

Pour les stations d'épuration de petite et moyenne taille, le séchage solaire s'impose comme une solution efficace de déshydratation des boues. Il permet de réduire les volumes et les masses des boues sèches d'une manière significative, ce qui permet la diminution du coût de transport et de stockage [52].

Plusieurs travaux de recherche ont été menés pour atteindre cet Object , parmi les techniques développées, il y a le séchage conductator avec agitation, il y a aussi le séchage solaire sous serre (directe) et Le séchage par rayonnement [53,54,2,6,55 ,56,57,58,59,60]

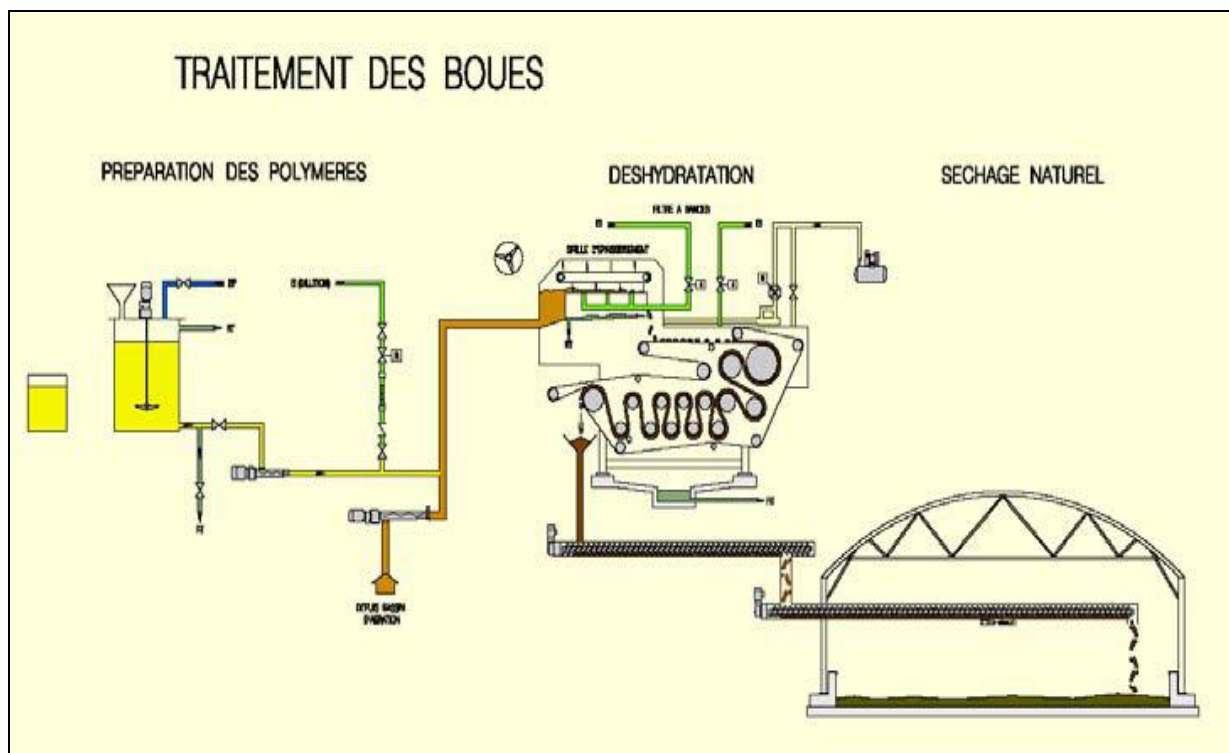


Figure N°12 : Schéma d'une filière complète de séchage solaire sous serre [6]

### 3.2.2.1.1. Avantages du séchage solaire :

Système adapté pour les stations de petites et moyennes capacités de moins de 100.000

EH, le séchage solaire s'est rapidement imposé comme une solution efficace permettant de répondre aux attentes des collectivités dans le respect des contraintes réglementaires, en offrant un choix multiple de débouchés pour le traitement des boues d'épuration.

Il permet:

- la réduction du volume (les volumes de boues sont réduits de 3 à 5 fois): l'influence est directe sur le coût de transport et sur le stockage ;
- l'hygiénisation : les températures et les temps de séjour entraînent généralement l'élimination des micro-organismes au cours séchage ;
- la stabilisation : la diminution de la teneur en eau, rendant toute activité biologique impossible, stabilise la boue sèche ;

- la réduction des odeurs émises : le stockage de la boue sèche n'engendre pas de problèmes d'odeurs, contrairement à celui de la boue fraîche ;
- l'augmentation du pouvoir calorifique des boues qui peut être intéressant en vue d'une incinération ;
- la mise en forme accompagnant le séchage : une mise en forme (granulée) de la matière séchée est souvent possible, facilitant transport et manutention ;
- un bilan environnemental positif puisqu'il n'y a pas d'émission de gaz à effet de serre, de plus la consommation énergétique n'est que de 20 à 80 kwh électriques par tonne d'eau éliminée (contre 700 à 1000 kwh thermiques/t d'eau évaporée - 70 à 120 kwh électriques / t d'eau évaporée pour les procédés conventionnels de séchage thermique).

Ce procédé réussit à convaincre bon nombre de collectivités grâce à ses très bonnes performances, comparables à celles du séchage thermique poussé (siccité finale comprise entre 60 et 80 %), et à un moindre coût en investissement, mais aussi grâce aux faibles coûts de fonctionnement qu'il engendre.

En effet, les installations fonctionnent en mode entièrement automatisé, sans nécessiter de surveillance permanente, ce qui leur confère une grande souplesse d'utilisation et d'exploitation par l'exploitant. Aucune manipulation dans la serre n'est nécessaire grâce aux systèmes de retournements de boue, les exploitations ne requièrent que quelques heures de main d'œuvre par semaine (ou par jour, selon les périodes de l'année) pour acheminer et évacuer les boues [6].

#### 3.2.2.1.2. Contraintes du séchage solaire

Le séchage solaire dépend fortement des conditions climatiques et atmosphériques. En effet en période hivernale la serre est souvent utilisée en lieu de stockage.

Ce système nécessite de la place (une parcelle ensoleillée) et du temps pour que la boue puisse sécher à la siccité désirée.

Le séchage solaire présente également des contraintes par rapport aux odeurs générées.

Pour un site situé à proximité d'habitations, les émissions d'odeurs lors du séchage peuvent être source de nuisances plus ou moins importantes selon la direction et la force des vents dominants et la présence ou non d'un dispositif de traitement de l'air [6].

### 3.2.2.2. Le séchage par rayonnement

- Les boues sont envoyées dans un tambour mis en rotation (vitesse tr/min). par centrifugation, la boue est projetée sur les parois du tambour. Une vis intérieure, tournant à une vitesse légèrement supérieure permet d'évacuer la boue ainsi déshydratée vers l'extérieur du tambour ;
- L'utilisation de polymère est nécessaire ;
- Ne demande pas une surveillance accrue du personnel ;
- Réglages peu aisés au démarrage ;
- Permet d'atteindre des taux de siccité de l'ordre de 25 à 30 % ;
- Consommation électrique importante, ce procédé de séchage est utilisé dans les stations de taille importante (> 50.000 EH).



FigureN<sup>0</sup> 13 : le procédé de Centrifugeuse [6].

### 3.2.2.3. Séchage par séchoirs :

Le séchage thermique d'activation des boues, exige une énergie intensive, c'est un processus très coûteux qu'il faudra optimiser en le faisant précéder au préalable par une opération de déshydratation mécanique des boues qui se présente donc d'une importance primordiale. [61]

Parmi les séchoirs développés pour les matériaux pâteux, citons le séchoir à palettes, séchoir à couches minces, séchoir pneumatique compact [62, 63, 64,65].

### 3.2.2.3.1. Séchoirs développés pour les matériaux pâteux [42] :

Le choix d'une technologie ne repose pas exclusivement sur les cinétiques de séchage et sur les propriétés à l'équilibre thermodynamique du matériau mais doit inclure des contraintes spécifiques à une situation donnée comme la structure initiale du produit.

Une classification des technologies basée sur la structure du produit humide (liquide/solide/pâteux) et son mode de transport est nécessaire.

L'opération de séchage est mise en œuvre sur des produits de structures variées :

- solides divisés (granuleux, fibreux, pulvérulents) ;
- solides compacts ou en plaques ;
- produits liquides ;
- produits pâteux.

La contrainte du séchage des matériaux pâteux est la difficulté de l'écoulement dans le séchoir. Ainsi les séchoirs développés pour ces matériaux sont : [66]

### 3.2.2.3.2. Séchoir à palettes

La Figure 14 présente le schéma d'un séchoir à palettes :

- Il se compose d'une auge à double paroi avec 2 ou 4 arbres creux rotatifs sur lesquels sont fixées des éléments creux formés pour interagir.

Ces éléments sont appelés palettes :

- Les deux arbres se chevauchent ;
- Le fluide caloporteur, généralement de la vapeur sous pression entre 6 et 8 bars, circule dans la double enveloppe ainsi que dans les rotors et palettes ;
- Un gaz de balayage est introduit à co-courant avec le matériau pâteux et extrait vers le milieu du sécheur pour minimiser l'entraînement des particules en suspension dans le gaz d'exhaure.

Ces équipements ont été développés pour sécher des matériaux pâteux, visqueux, formant des croûtes ou des mottes sans recirculation du produit sec en tête de l'installation.

Les parties en mouvement sont essentielles pour le système. Pour un transfert de chaleur efficace, le matériau doit être régulièrement renouvelé et le contact avec la surface de transfert de chaleur doit être optimal.

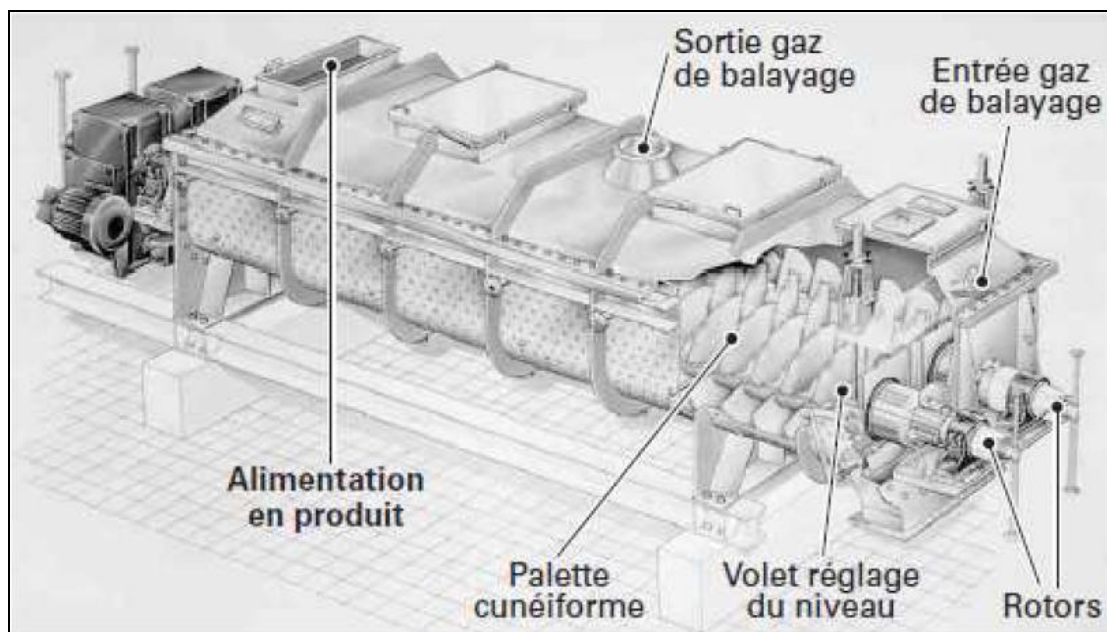


Figure N°14 : Séchoir à palettes Naratherm [66]



Figure N°15 : Palettes du séchoir à pales [66]

### 3.2.2.3.3. Séchoir à couche minces

Les séchoirs à couche mince horizontaux (Figure 16) sont utilisés depuis de nombreuses années pour le séchage des matériaux difficiles. Ils comportent un corps cylindrique horizontal muni d'une double enveloppe, dans laquelle circule la vapeur d'eau surchauffée sous une pression de 6 à 8 bars [66].

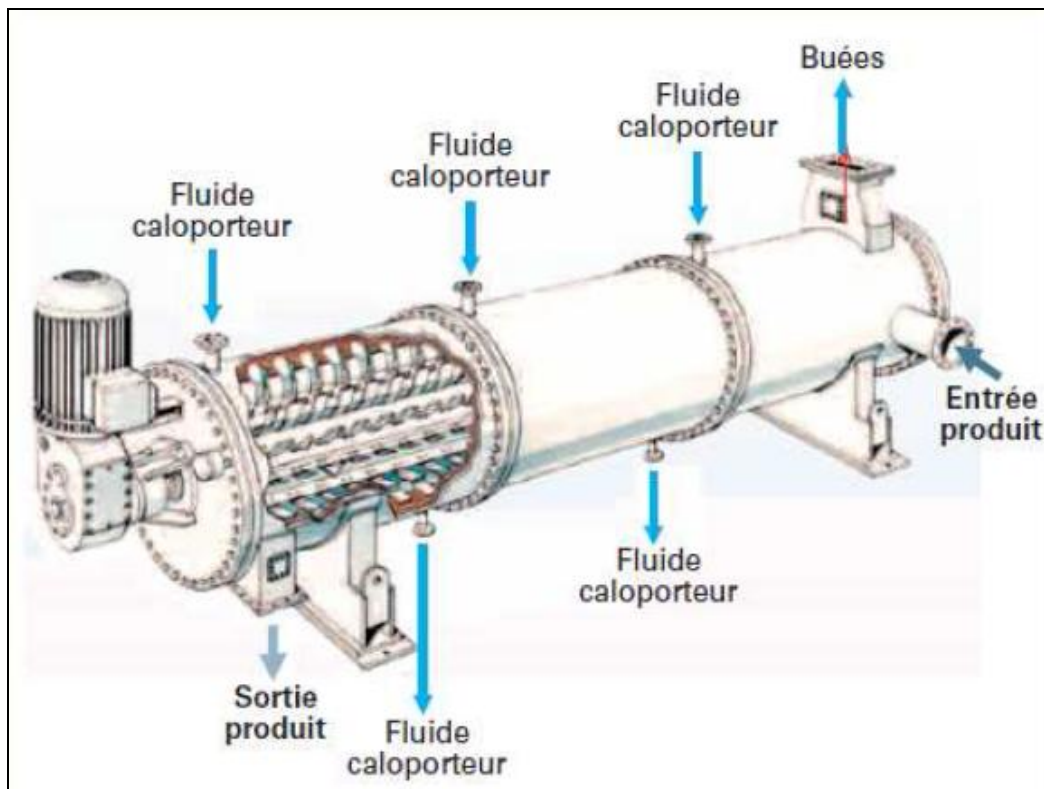


Figure N°16 : Séchoir à couches minces horizontales. [66]

Le principe de fonctionnement consiste à projeter le matériau pâteux, introduit latéralement, contre l'enveloppe cylindrique à l'aide de pâles pendulaires fixées sur un rotor tournant à grande vitesse. Le matériau est encollé en couche mince de 5 à 10 mm d'épaisseur, ce qui permet d'atteindre des coefficients d'échange de chaleur paroi/produit très élevés. Il en résulte un temps de séjour moyen de l'ordre d'une dizaine de minutes. Les pâles assurent le raclage et le transport du matériau. Les buées circulant à contre-courant du matériau sont évacuées près de l'entrée du matériau.

Le séchage se déroule dans une enceinte fermée, ce qui permet de travailler, si nécessaire, sous atmosphère inerte ou sous vide et de limiter la diffusion d'odeurs nauséabondes. La conduite du procédé se trouve facilitée par la faible quantité de matériau retenue dans l'appareil.

Le principal inconvénient de ces appareils est leur faible compacité, de sorte que les plus grandes installations offrent une surface utile au séchage de seulement 110 m<sup>2</sup> [66].

#### 3.2.2.3.4. Séchoir pneumatique compact :

Les sécheurs pneumatiques compacts (Figure 17) sont peu répandus en France, ils se présentent sous la forme d'une chambre cylindrique verticale avec un fond conique, d'un distributeur d'air à entrée tangentielle et d'un rotor tournant à grande vitesse (de 50 à 500 tr/min) positionné en bas de la chambre.

Le matériau pâteux, homogénéisé par agitation mécanique dans le bac d'alimentation et soutiré en continu et à débit constant, tombe par gravité au-dessus du rotor. Le mobile équipé de couteaux cisaille, émotte et disperse le matériau pâteux. L'air de séchage, injecté en partie basse de la chambre, génère un écoulement ascendant tourbillonnant et une sorte de lit fluidisé à proximité du mobile. Le lit de particules contient ainsi toutes les phases intermédiaires entre la matière première et le produit fini.

Les particules les plus lourdes séjournent plus longtemps dans la chambre de séchage, où elles subissent l'action mécanique du rotor et des chocs avec les autres particules en suspension. Seules les particules les plus fines peuvent être entraînées hors de la chambre de séchage où elles sont collectées. Ainsi les matériaux pâteux, collants, les liquides visqueux et les matériaux à forte teneur en eau initiale peuvent être transformés en une poudre fine, de taille comprise entre 3 et 70 $\mu\text{m}$ , en quelques dizaines de secondes.

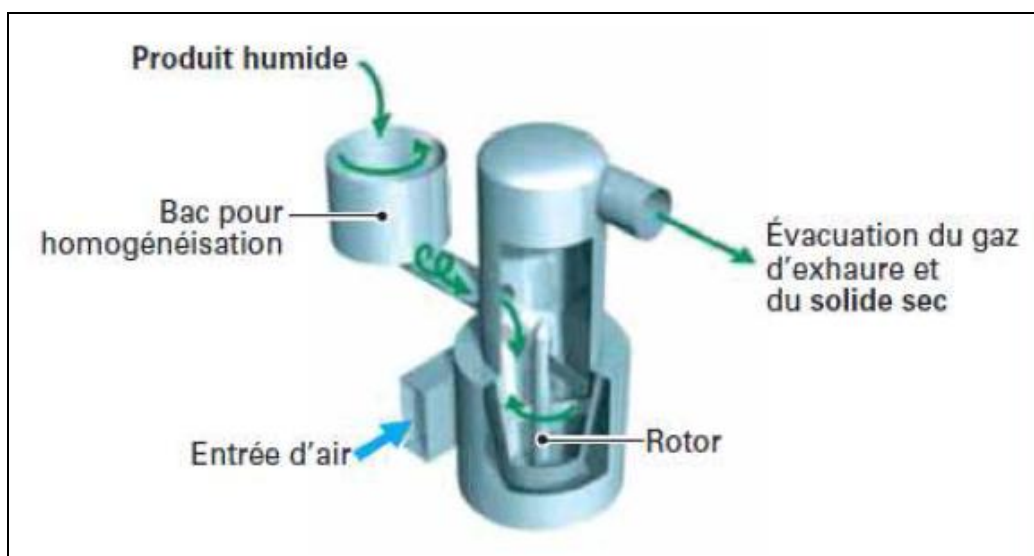


Figure N°17 : Séchoir Swirl Fluidizer [66].

Ce séchoir spécifiquement développé pour le séchage des matériaux pâteux et liquides très visqueux peut fonctionner en boucle ouverte, l'air étant alors utilisé comme fluide caloporteur, ou en circuit semis-fermé ou fermé pour inertage de la chambre. Le temps de séjour moyen des particules est difficile à contrôler [66].

**Tableau N° 1 : récapitulatif des étapes de traitement des boues, techniques, avantages et inconvénients, siccité obtenues et types de station adaptés [67].**

Traitement		Avantages	Inconvénients	Siccité atteinte	Station Adapté	
Epaississement	Gravitaire	<b>Décantation + Drainage</b>	-Une exploitation simple. -Un peu couteuse.	-Faible performance avec les boues biologiques. -Temps de séjour très long.	2 – 10%	Tout type de station
	Dynamique	<b>Egouttage (drainage)</b>	- Simple et efficace. - Peu couteux. - Performante		4.5 – 6 %	Petite et moyenne station
		<b>centrifugation</b>	- - Rapide et compact	-Consommateur d'énergie. -Très sensible à la qualité des boues	4 – 6 %	
		<b>Flottation</b>	-Bien adapté aux boues biologiques. -Rapide.	-Forte demande énergétique. -Investissement élevé. -Fonctionnement délicat.	3.5 – 5 %	Grande station
Stabilisation	Chimique	<b>Chaux</b>	-Augmentation de PH des boues (>12). -Réduction de la contamination fécale et des germes d'origine fécale. -Pas d'odeur indésirable, augmentation de la siccité et de la valeur agronomique. -Facilité le transport et le stockage des boues.	Manipulation délicate (chaux vive le plus souvent).	25 – 35 %	
		<b>Traitement aux nitrites</b>	- Efficace contre la plus part des germes fécaux. - pH neutre, produit stable. - Augmentation de la siccité. - Réaction rapide.			Petite station
Hygiénisation	Biologique	<b>Digestion aérobie</b>	Compactage - siccité atteinte élevée. - pH neutre, produit stable. - facilité le transport et le stockage des boues. - logique (produit) possible.		35 – 70 %	moyenne et grosse station
		<b>Digestion anaérobie</b>	Méthanisation - Réduction jusqu'à 50 % du volume. - Facilite de transporter et stoker. - Production de biogaz	Pas efficace pour l'élimination des germes pathogène	20 – 30 %	Grande station
	<b>Stabilisation aérobie thermophile (SAT)</b>	- Solution alternative a la méthanisation. - Faible temps de séjour. - Moins d'investissement. - Boues sorties peuvent directement être épandues. - Nuisance olfactive réduite	-Moins performant que la méthanisation.  - Consomme plus d'énergie que la méthanisation	22 %	Tout type de station	

Épaississement	<b>centrifugation</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fonctionnement en continu.</li> <li>- Totalement automatisé et fermé, plus compact que filtre presse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cout élevé.</li> <li>- Nécessité un contrôle de la nature des boues.</li> </ul>	20 (jusque 30 % si chaulage préalable)	Tout type de station
	Filtre presse	<b>A bande</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Levage régulier.</li> <li>- Performance pour boues biologique.</li> <li>- Grande productivité.</li> <li>- Fonctionnement en continu.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incapacité de traiter les boues fibreuses.</li> <li>- Technique abandonnée</li> </ul>	25 %	Petite et moyenne station
		<b>A plateaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Entretien limité.</li> <li>- Tous types des boues (préalablement épaissies)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inadapté pour les boues collantes.</li> <li>- Investissement élevé.</li> <li>- Automatisation possible.</li> </ul>		Grande station
			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmentation de siccité par rapport au filtre a plateaux.</li> <li>- 40% de productivité en plus que le filtre plateaux.</li> </ul>			Peu répandu
			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bien adapté aux boues fibreuses.</li> <li>- Fonctionnement en continu.</li> </ul>			
Séchage	Lit de séchage	<b>Solaire</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Séchage rapide pour une quantité importante, forte réduction des volumes à gérer.</li> <li>- Hygiénisation des boues par la chaleur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Demande en surface importante.</li> <li>- Nuisance olfactive</li> </ul>		Moyenne station
		<b>Langue de</b>	Procédé rustique et peu onéreux	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temps de séjour très long (1-3 ans).</li> <li>- Risque de contamination de la</li> </ul>		
		<b>Au sable</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Siccité atteinte élevée : réduction de volume importante, rustique.</li> <li>- Procédé peu onéreux.</li> </ul>	Nécessite une surveillance rigoureuse	≤ 60 %	
		<b>A macrophyte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boues prélevées directement du bassin de STEP.</li> <li>- Temps de séjour d'environ 28 jours.</li> </ul>		10 – 20 %	
	Thermique		<b>Indirecte (total)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bonne élimination des micro-organismes.</li> <li>- Pas d'odeur indésirable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cout très élevé.</li> <li>- Consommateur d'énergie.</li> <li>- Difficulté d'exploitation.</li> </ul> Liée à l'entretien (arrêt) du sécheur.	90– 95%
		<b>Direct (partiel)</b>			< 70 %	

#### 4. La congélation :

Le principe de base de la congélation comme procédé de traitement des eaux est basé sur le fait que lorsque l'on congèle une solution aqueuse, les cristaux de glace formés sont constitués d'eau pure, le soluté ou polluant restant dans la phase liquide aqueuse. L'image du procédé de congélation que l'on peut mémoriser est que le cristal de glace en cours de formation ne se « nourrit » que de molécules d'eau [68].

Il agit d'un procédé peu utilisé l'actuellement en France et qui a peu d'avenir car le cout des frigories est plus élevé que celui des calories mais on peut, dans certains cas, disposer de gaz liquide ou de fluide frigorifique onéreux ou de récupération. Elle s'effectue à des températures de (-10,-20C<sup>0</sup>) pendant une durée de 1 à 4 heures.

Les résultats sont intéressants pour la centrifugation. Sur le plan pratique, on injecte un gaz liquéfié (généralement du butane) l'eau des boues gèle sous forme d'aiguilles de glace qui se placent au centre dans une centrifugeuse, lorsque la température élève les matières solides et l'eau sont bien séparées [68].

#### 5. Stabilisation des boues

Les boues de stations, en grande proportion à caractère organique, sont instables dans la mesure où des fermentations s'y développent, qui elle sont à l'origine d'une mauvaise qualité des eaux et de nuisances olfactives. La stabilisation vise donc à réduire le taux de matières organiques de manière à empêcher ou tout du moins limiter les fermentations.

La stabilisation, qui n'est pas effectuée de manière systématique, a pour but d'éviter une reprise de la fermentation des boues qui entraînerait des nuisances olfactives. Dans le même temps, le taux d'agents pathogènes est réduit dans des proportions qui varient selon le type de traitement. On distingue les stabilisations biologique, chimique et thermique. [6].

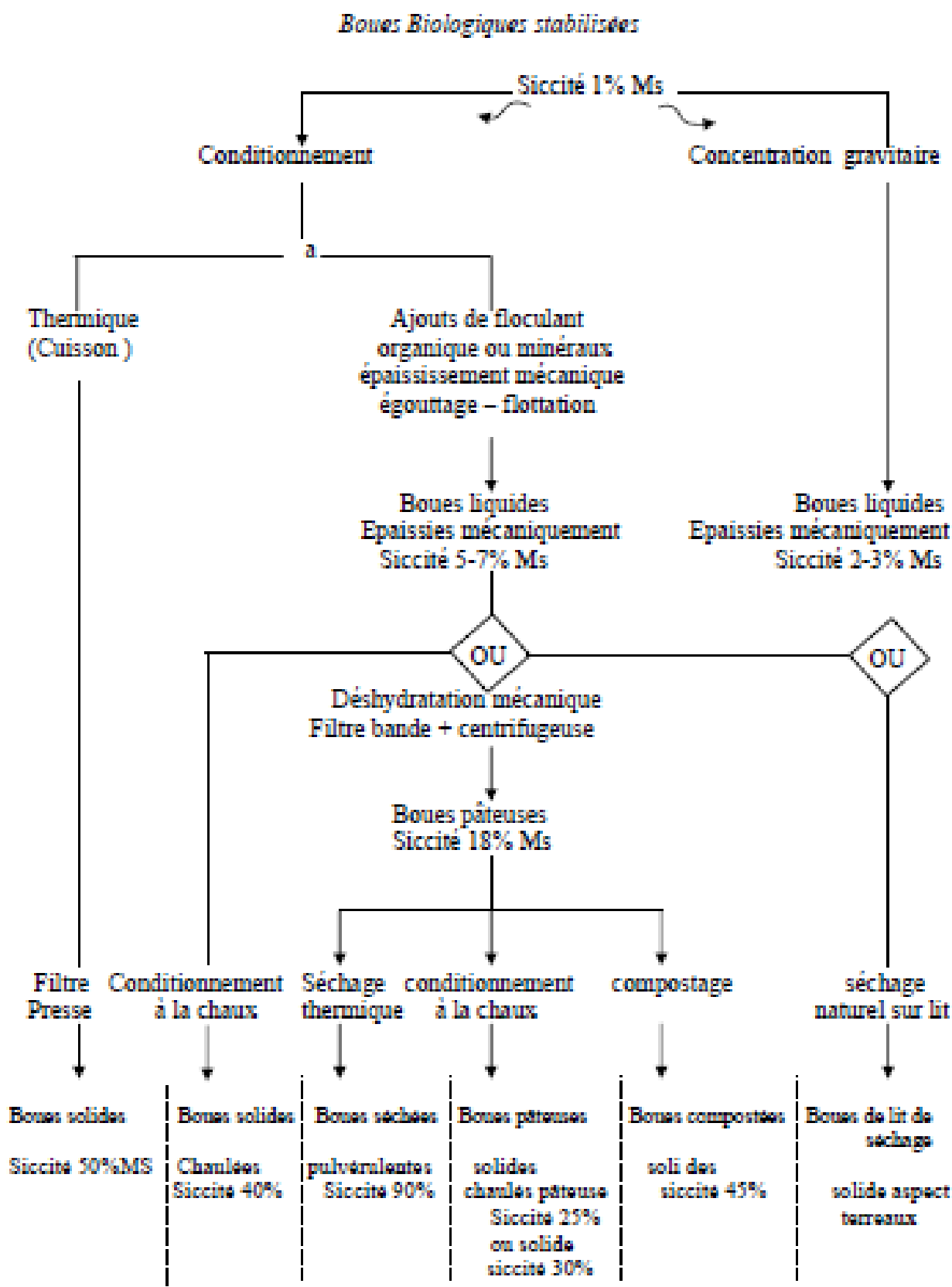
Dans la stabilisation biologique, les boues primaires et les boues activées en excès sont souvent mélangées, elles présentent une tendance à la fermentation, on aère ce mélange avec l'air ou de l'oxygène, on assiste alors à une minéralisation de la matière organique en Co<sub>2</sub>, ce procédé permet l'élimination de certains parasites, cette technique résume la digestion aérobie, tandis que pour la digestion anaérobie, et qui a bénéficié d'une grande publicité, permet une production des gaz combustibles, elle consiste à favoriser le développement des bactéries méthanifères qui agissent en anaérobie sur la matière organique en la décomposant en produisant le méthane, selon Maes, ce procédé peut être important pour certaines cultures lorsqu'on prévoit l'utilisation agricole. [12].

La stabilisation non biologique ou chimique comporte la pasteurisation, et le traitement à la chaux. La pasteurisation consiste à l'injection de vapeur à une température de 80 ° durant 30 mn ; Les boues sont désinfectées mais non stérilisées [12].

Le séchage (siccité supérieure à 90%) quant à lui constitue une forme de stabilisation thermique. [6].

Le compostage constitue un procédé particulier de stabilisation biologique aérobie il se réalise de préférence sur les boues déjà déshydratées, les boues compostées ont une structure solide [12].

Figure N°18 : Les principaux types de boues issues des sous produits biologiques stabilisés [12].



**Conclusion :**

L'importante quantité d'énergie à fournir par unité de masse pour évaporer l'eau, grève le plus souvent le coût énergétique de l'opération. C'est pourquoi une séparation solide/liquide par épaissement ou par voie mécanique (déshydratation mécanique) est nécessaire préalablement au séchage de façon à obtenir une boue urbaine contenant 20 à 25 % de matières sèches. La majorité des stations d'épuration disposent d'une centrifugeuse qui assure la déshydratation des boues liquides et permet de récupérer à sa sortie des boues à une siccité d'environ 20 %.

Une opération de séchage en aval de la déshydratation augmente la siccité jusqu'à environ 60 %, lorsqu'il s'agit alors d'un séchage partiel, ou jusqu'à 90 à 95 % s'il s'agit d'un séchage poussé. Malgré son coût énergétique élevé, le séchage des boues présente plusieurs avantages.

Il permet de réduire de façon conséquente le volume des boues. Par rapport à une boue épaissie à 5 % de siccité, la déshydratation mécanique jusqu'à une siccité de 25 % .

# **Chapitre II**

***Définition et mise en œuvre d'un protocole  
expérimental de séchage naturel des boues***

***de STEP***

**Introduction :**

Ce chapitre est consacré à l'expérimentation de séchage de boue de STEP par des mélange de déchets de cimenterie ;le cas ici traité est celui des boues de la STEP de la ville de Souk-Ahras, produisant en 2012 , 23346 t/an de boues réparties sur une superficie de 8712 m<sup>2</sup> de lits de séchage et mises en dépôts sur 17424 m<sup>2</sup> d'aire de dépôt [23].

La réduction du facteur spatial des boues est conditionnée par un séchage dont le temps nécessaire devrait être le plus court possible ; cet objectif pourrait t il se réaliser par une approche combinant au travers de mélange à différents pourcentages de boue de la STEP de la ville de Souk Ahras aux déchets d'origine calcaire (farine de ciment et de briques réfractaires à base de magnésie d'une part et de déchet de bois d'emballage d'autre part de la cimenterie ?

Le cas présent se rapporte à la cimenterie de Hadjar Essoud située dans la Wilaya de Skikda, située au Nord Est Algérien. En effet cette usine rejette 80-100 milles t/an de la farine de ciment et 80- 120 t/an de rebut de briques réfractaires déclassées après usage et 3-5 tonnes/an de déchet de bois d'emballage.

Dans le système actuel le temps de séjours en situation normale serait dans les lits de séchage de 15 et 45 jours respectivement en période estivale et hivernale.

Cette recherche vise la mise en œuvre expérimentale de technique permettant de réduire au maximum le temps de séchage des boues des stations d'épuration. Dans ce but il est proposé une expérimentation de la déshydratation des boues des STEP par les mélanges à différents pourcentages des déchets de cimenterie.

Les déchets sont ainsi qualifiés : farine de ciment (**FC**) , briques réfractaire à base de magnésie finement broyées (**BRMFB**) et sciure de bois finement broyée (**ScBFB**).

**1. Localisation**

La station d'épuration des eaux usées Souk Ahras est localisée à environ 5 km de la ville ; elle se situe entre 36°16'9.54"N et 7°59'42.81"E Nord et entre 36° 15" et 6°60" Est. (La carte des rejets tirée du cahier n°2 de l'Agence du Bassin Hydrographique (Figure 19).

La station d'épuration de la ville de Souk Ahras est destinée à traiter les eaux usées domestiques avant leur rejet dans l'oued Medjerda.

La station d'épuration des eaux usées de la ville de Souk–Ahras est une station à boue activée a faible charge d'une capacité de 150.000 EQ/H pour un débit de 30.000 m<sup>3</sup>/j ; extensible à 225.000 EQ/H pour un débit de 45 000 m<sup>3</sup>/j. Elle s'étend sur une superficie de 13 hectares [23].



Figure N°19 : Image satellite de la station d'épuration des eaux usées Souk Ahras[23].

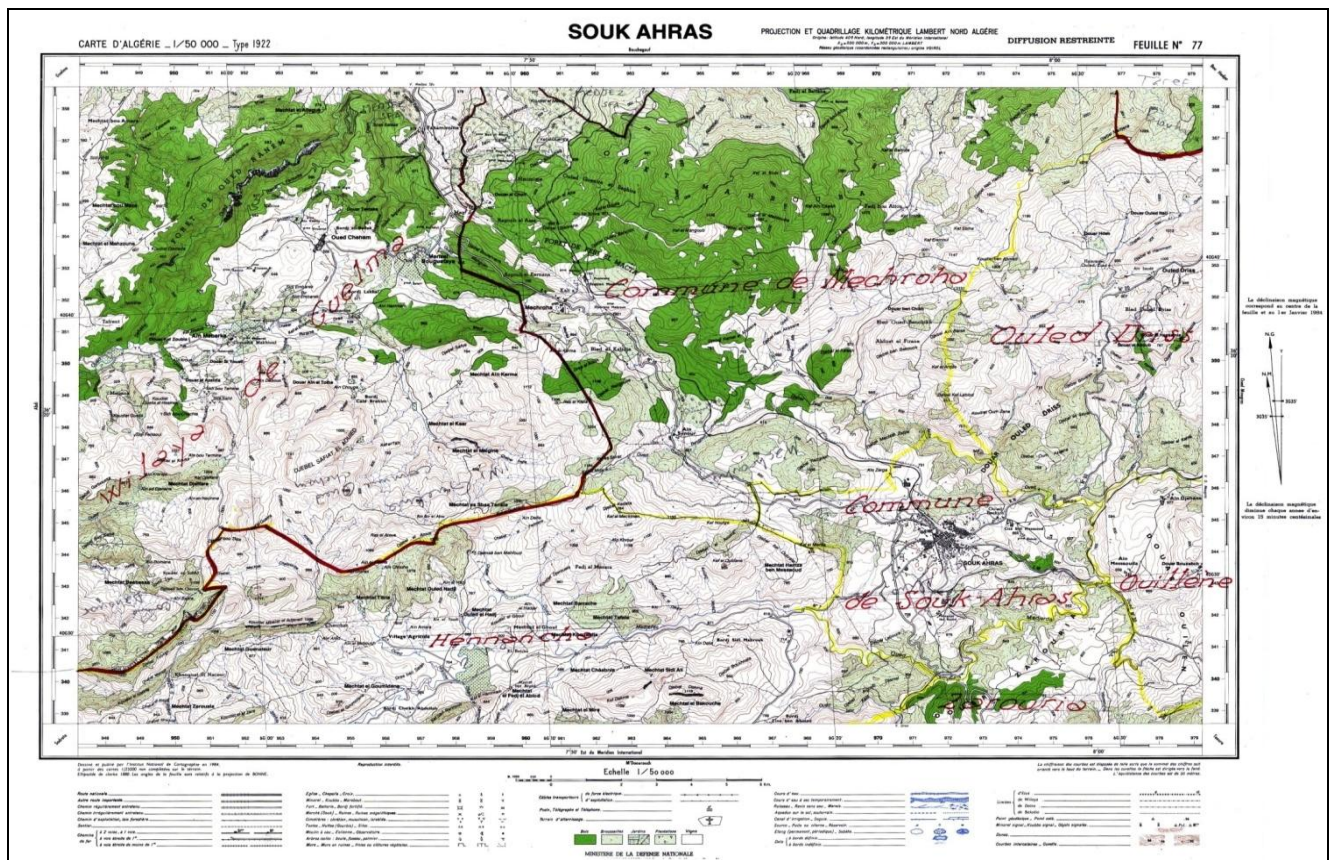


Figure N°20 : Situation géographique [1]

## 2. Capacité de traitement des boues :

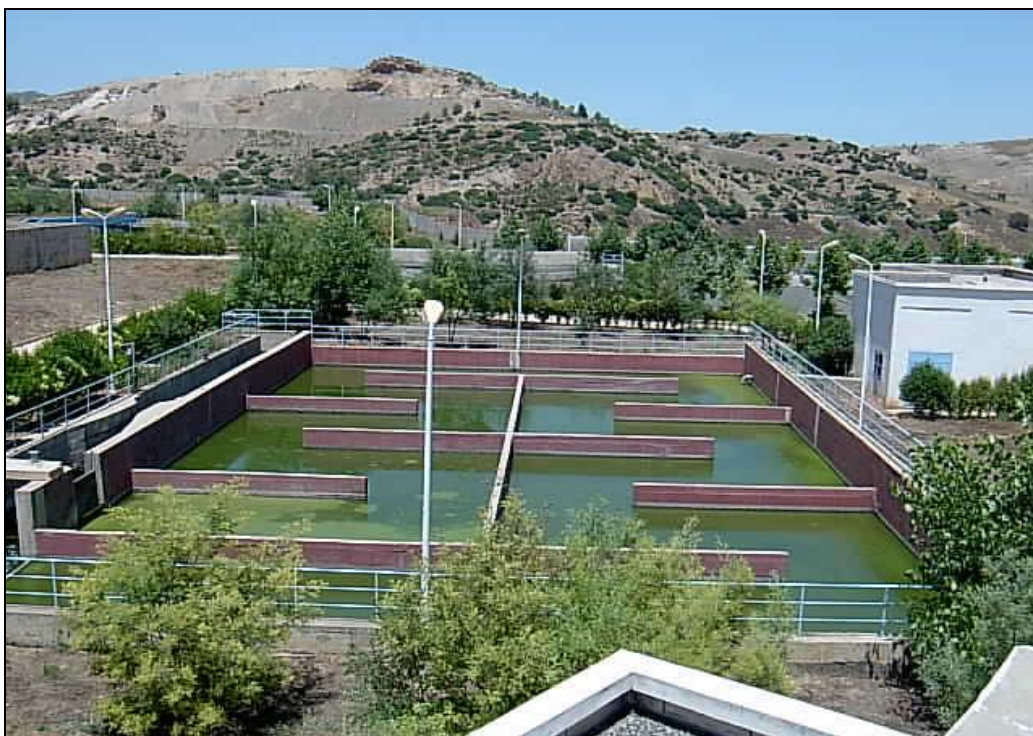
La station d'épuration de Souk Ahras fonctionne selon le principe de la boue activée d'une :

- Capacité : 30.000 m<sup>3</sup>/j (6300 kg/j) ;
- Charge Massique : 0,07 Kg DBO<sub>5</sub>/Kg MS/j ;
- Charge Volumique : 0,34 Kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>/j ;
- Age de boue : 21 jours.

L'effluent traité est rejeté actuellement dans l'Oued Medjerda. Il pourrait être refoulé et utilisé pour l'irrigation [24].

Les boues utilisées lors de nos expériences, sont de type primaire en provenance de la station d'épuration et comprend principalement :

- Un dégrillage ;
- Une installation de limitation et de mesure de débit, avec envoi dans un bassin d'emmagasinage en cas de fortes pluies et recyclage vers la station dès que le débit d'entrée le permet.



**Figure N°21:** bassin d'emmagasinage [23]

### 3. Fonctionnement

Les boues issues de la station d'épuration Souk haras ont été produites selon les étapes suivantes :

#### 3.1. Prétraitements

Le prétraitement a pour objectif l'extraction des matières les plus grossières (brindilles, feuilles, tissus, ...) et des éléments susceptibles de gêner les étapes ultérieures du traitement. Il comprend [69]:

➤ **Le dégrillage :**

Pour retenir les déchets volumineux à l'aide d'une succession de grilles (2 à 4) de plus en plus fines. Les résidus recueillis sont déposés en décharge.

➤ **Le dessablage :**

Pour prévenir les dépôts dans les canalisations, protéger les organes mécaniques (pompes) contre l'abrasion et éviter de perturber les autres étapes de traitement. Les sables, recueillis généralement par raclage en fond de bassin, sont recyclés.

➤ **Le dégraissage-déshuilage :**

Pour éviter l'encrassement de la station par des corps gras. Effectuée dans le même bassin que l'étape de dessablage, la récupération des graisses et huiles se fait en surface. Les composés collectés seront alors incinérés (cas du traitement d'un effluent urbain) ou recyclés pour la fabrication de savons ou détergents (cas de certains effluents industriels) en fonction de leur qualité. [69].



**Figure N° 21 : Dégrillages grossiers [23].**

### **3.2. Traitement biologique :**

Le traitement biologique des eaux usées est en termes de rendement d'élimination et de qualité de l'effluent traité, plus performant que les traitements physiques et physicochimiques.

L'objectif du traitement biologique est l'élimination des matières réductrices réellement dissoutes, les matières organiques et l'ammonium



**Figure N°23 : Traitement biologique [23].**

### 3.3. Décantation secondaire

Les traitements secondaires regroupent tous les procédés d'épuration biologiques. Ces procédés biologiques impliquent la présence de micro-organismes qui dégradent et transforment la pollution organique dissoute et colloïdales contenue dans les eaux usées.

Pour ce faite, les micro-organismes ont besoin d'oxygène. Dans la plupart des procédés, cet oxygène est fourni artificiellement par un système d'aération. Les principaux procédés biologiques utilisés sont les procédés extensifs et les procédés intensifs.



**Figure N°24 : Décantation secondaire [23].**

### 3.4. Traitement des boues :

Les boues issues de l'épuration des eaux usées subissent d'importants avant leur valorisation agricole.

#### a. Épaississement des boues :

La suspension boueuse est introduite dans un épaisseur, il permet de concentrer au maximum les boues (de 15 a 100g /l) pour la réduction de leur volume. (Figure 24).



**Figure N°25 :** Epaississement des boues [23].

### 3.5. Lits de séchage des boues :

Les boues épaissies sont répandues sur les lits de séchage par l'intermédiaire d'un réseau de tuyaux adapté pour l'admission (Figure 25).

Le liquide surnageant sera évacué manuellement par les vannes murales au cours des trois premiers jours et renvoyé dans la station. Le restant de l'eau sera perdu par percolation et évaporation. Les boues séchées sont enlevées à la pelle pour évacuation.



Figure N°26 : Lits de séchage des boues [23].

#### 4. Boues résiduaire

L'appellation des différents types de boues résulte de la combinaison de plusieurs critères

- Nature de l'effluent (urbain, laiterie, abattoir, papeterie,...) ;
- Caractéristique du traitement des eaux (primaire, physico-chimique, biologique) ;
- Procédé de stabilisation (aérobie, anaérobie, chaulage, compostage) ;
- Etat physique des boues (liquide, pâteux, solide, pulvérulent, granulé) ;
- Type de matériel de déshydratation (filtre-presse, centrifugeuse, table d'égouttage,...).

Tableau N°2 : Type des boues de station d'épuration

	Boues Liquide	Boues Pâteuses	Boues Chaulée	Boues Compost	Boues Sèche
Teneur en matières sèches MS	2 à 7	16 à 22	90 à 95	25 à 40	40 à 60
Teneur en matière organiques %MS	65 à 70	50 à 70	50 à 70	30 à 50	80 à 90
Teneur en matières minérales %MS	30 à 35	30 à 50	30 à 50	50 à 70	10 à 20
pH	6.5 à 7	7 à 8	6 à 8	9 à 12	6 à 7
Rapport carbone / azote(C / N)	4 à 5	5 à 6	4 à 6	8 à 11	15 à 25
Azote (Kg N/T brute)	2 à 4	8 à 12	30 à 50	6 à 9	5 à 9
Phosphore (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /T brute)	2 à 3	6 à 9	50 à 70	6 à 10	6 à 8
Potassium (kg K <sub>2</sub> O/T brute)	0.9	0.8	5	1	1 à 2

Source : [70]-(dossier documentaire)

Les boues traitées en vue d'un épandage peuvent être :

- Boues liquides : siccité 2-5%, produites par les petites stations (< 2000 EH), elles ont subi un épaissement ou un stockage en silo.
- Boues pâteuses : siccité 15-25%, issues de la digestion biologique, correspondent à des STEP de taille moyenne (65 000-20 000 EH). Elles ont subi une déshydratation sur filtre à bande ou une centrifugation.
- Boues chaulées : siccité 25-30%, ce type de boues peut être pâteux ou solide, produit par des STEP de taille moyenne à grande (20 000 - 100 000 EH). Elles sont issues d'un chaulage après une déshydratation.
- Boues compostées : siccité 35-70%, issues d'un compostage des boues déshydratées.
- Boues de lagunage : siccité de 10-20%, elles correspondent à une catégorie particulière de boues liquides traitées de façon extensive par des macrophytes.
- Boues solides : résultent d'un traitement par filtre presse ou d'un séchage thermique.

Elles sont produites surtout par des grandes STEP (coût de production assez important)[71].

Deux types des boues sont dans cette étude proposés :

- a) Boue prélevée au niveau de l'épaisseur (siccité = 0%) ;
- b) Boue prélevée au niveau des lits de séchage (siccité = 20%-30%).

Les boues utilisées dans notre expérimentation ont été produites en mois de Décembre 2011, et Août 2011, elles sont d'une couleur noire foncé, odeur désagréable, présence d'une faune remarquable (larves, nématodes,...).

Les boues ont été prélevées d'une façon aléatoire sur des lits de séchage (aussi bien sur les extrémités des lits qu'au centre).

Des échantillons de boues ont aussi été prélevés au robinet de vidange de l'épaisseur.

#### **4.1. Boue prélevée au niveau de l'épaisseur (siccité = 0%)**

Cet épaissement peut se faire simplement par voie gravitaire dans un concentrateur ou par des moyens mécaniques (égouttage, flottation ou centrifugation).

La siccité des boues épaissies ne dépasse pas usuellement 7 % en moyenne, elle varie entre plutôt 5 à 6 %.

#### 4.2. Boue prélevée au niveau des lits de séchage (siccité = 20 à 30 %)

A ce niveau, l'action de l'évaporation sur des boues liquides, combinée au drainage de son eau libre, à travers une couche filtrante de sable et de graviers, permet la déshydratation de ces boues.

Ce système intensif donne des boues sèches à 35 - 40 % de siccité. Dans ces essais :

- Deux **échantillons** de boue sont **prélevés sur le premier lit de séchage** le premier après 18 h (en été) et le second après 12 j (en d'hiver)
- Deux prélèvements de boues ont été effectués à la sortie de l'épaisseur, la siccité était de 20% et de 30% respectivement en été et en d'hiver

La mesure de la siccité a été faite au laboratoire de la STEP de Souk Ahras. Les analyses chimiques des métaux lourds ont été faites au laboratoire de chimie de université de Badji, Mokhtar – Annaba.

#### 5. Présentation de la société des ciments de Hadjar-Soud (S.C.H-S) :

- La société des ciments de Hadjar-Soud était une filiale du groupe ERCE/GIC. Un partenariat s'est constitué, à partir du 01 février 2008, entre le groupe ERCE majoritaire avec 65% et l'italien BUZZI-UNICEM 35% de participation dans le Capital Social.

- La cimenterie de Hadjar-Soud est située sur l'axe de la Route National 44 reliant ANNABA-CONSTANTINE et SKIKDA, soit à 50 Km d'ANNABA. La cimenterie est située sur territoire de la commune de Bekouche Lakhdar –Daïra de Azzaba, Wilaya de Skikda.

- La superficie de l'assiette du terrain de la cimenterie est de 29 ha 52 a 40 ca. Elle est limitée par la ligne du chemin de fer à laquelle elle est raccordée par un tronçon de voie interne.

- La cimenterie qui est opérationnelle depuis 1973, intègre dans sa globalité le processus de production du ciment : Gisements de matières premières (calcaire, argile et sable) – Transport - Production de clinker et ciment – Stockage – Expédition, avec une capacité de production de 900 000 tonnes /an de ciment CPJ CEM II 42,5 /A.

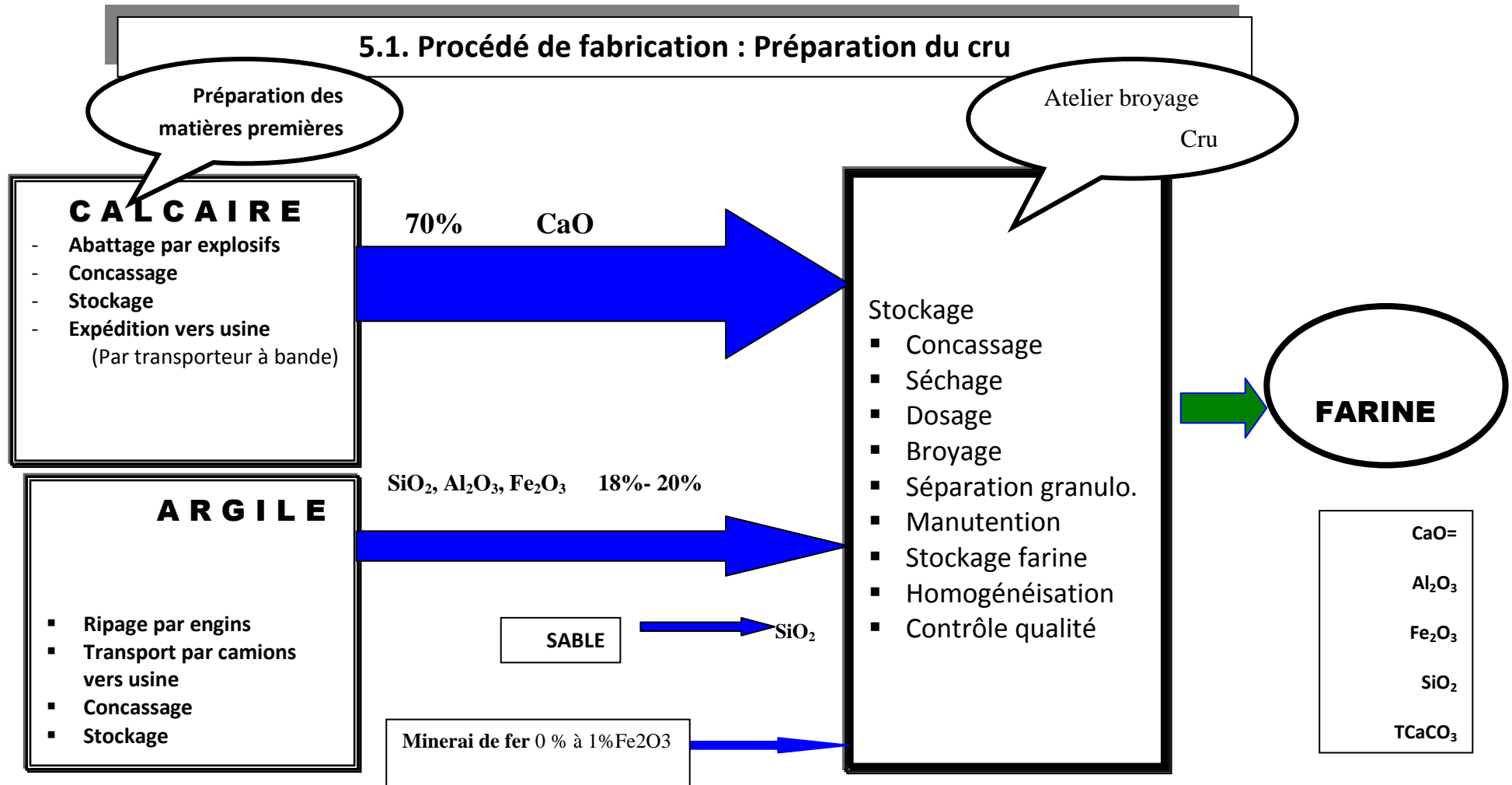
- Initialement la cimenterie est constituée de 2 lignes de production, mise en production en 1973(1<sup>o</sup>ligne) et 1975 (2<sup>o</sup>ligne).

Les principaux investissements réalisés ces dernières années sont :

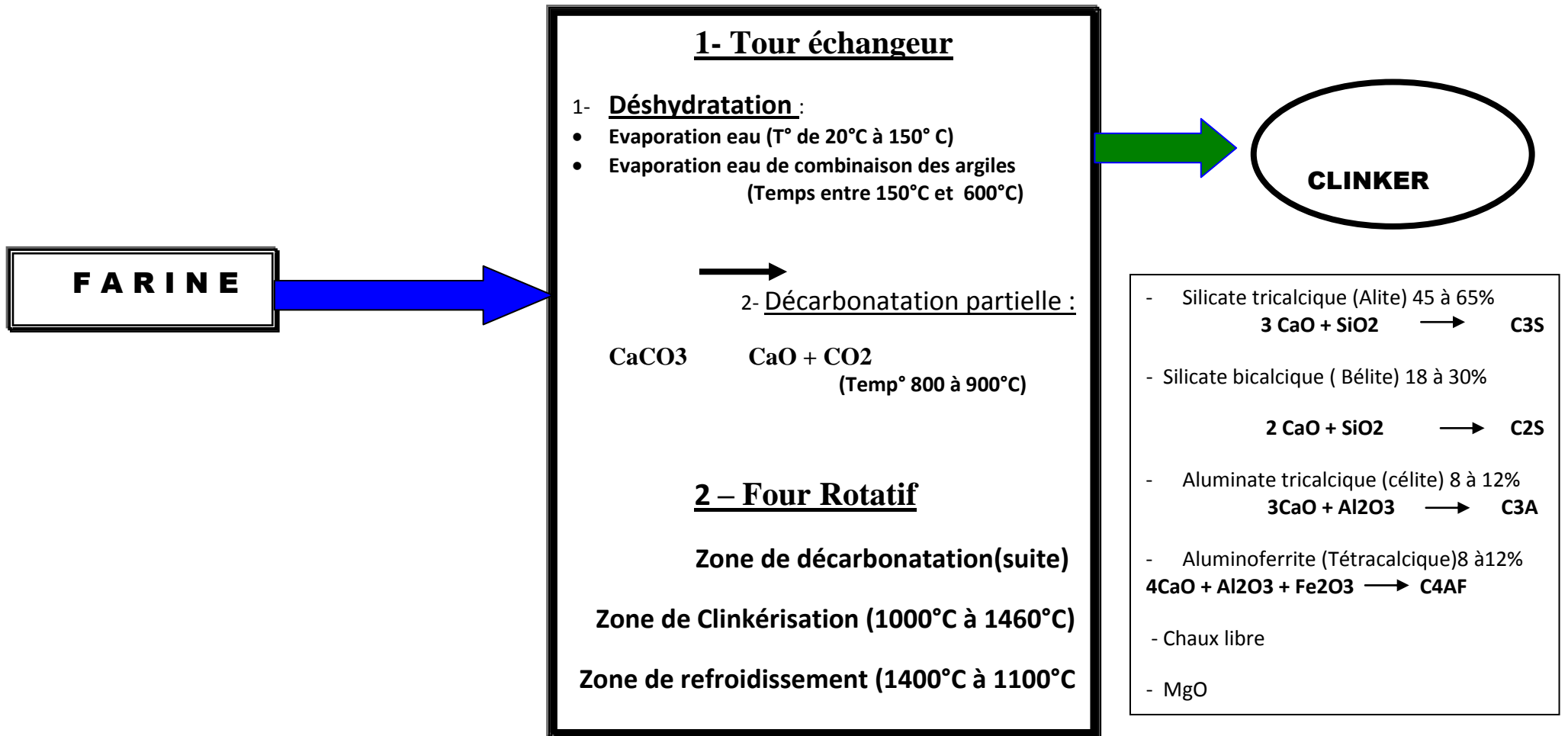
- ↖ Construction d'un 3<sup>ème</sup> atelier broyage Cru (FLS)
- ↖ Installation d'un pré-calcaiteur au niveau de la 2<sup>ème</sup> ligne(FCB)
- ↖ Construction d'un atelier pour le séchage du laitier (Centunion)
- ↖ Rénovation des électro filtres ;
- ↖ Construction d'un nouveau laboratoire ;
- ↖ Installation des nouveaux filtres à manches de la nouvelle technologie.

**A- Les principaux moyens de production :**

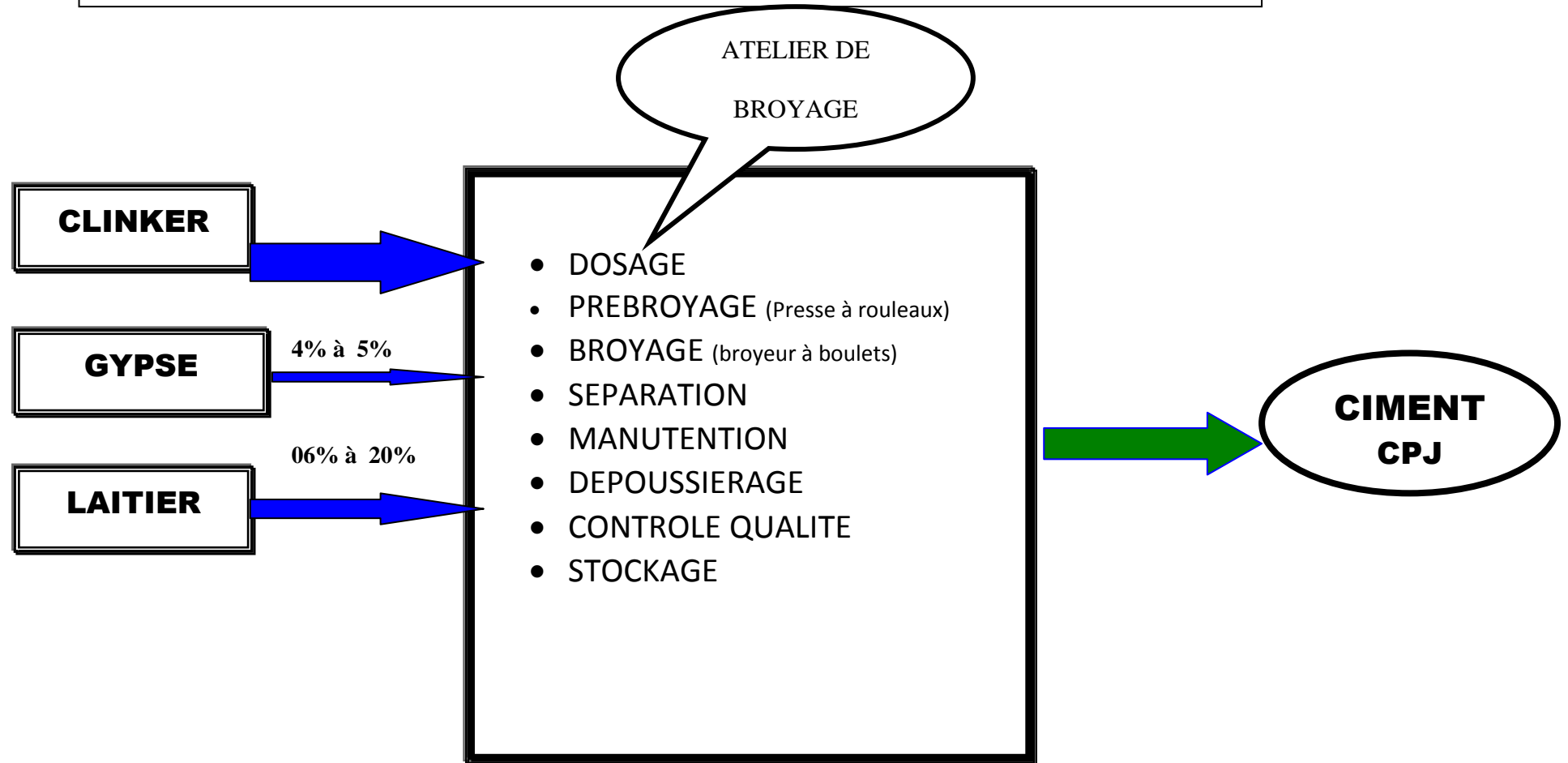
- ↖ 2 Carrières pour l'abattage et le concassage des matières premières (calcaire et argile)
- ↖ 3 Ateliers de broyage de matières premières
- ↖ 2 Ateliers de cuisson
- ↖ 2 Ateliers broyage du clinker avec presse à rouleaux pour le pré-broyage.
- ↖ 1 Laboratoire pour le contrôle de la qualité
- ↖ 1 Atelier pour le séchage du laitier
- ↖ 24 Silos en béton armé pour le stockage (farine : 4, clinker : 12, ciment : 8).
- ↖ Une flotte importante de matériel roulant



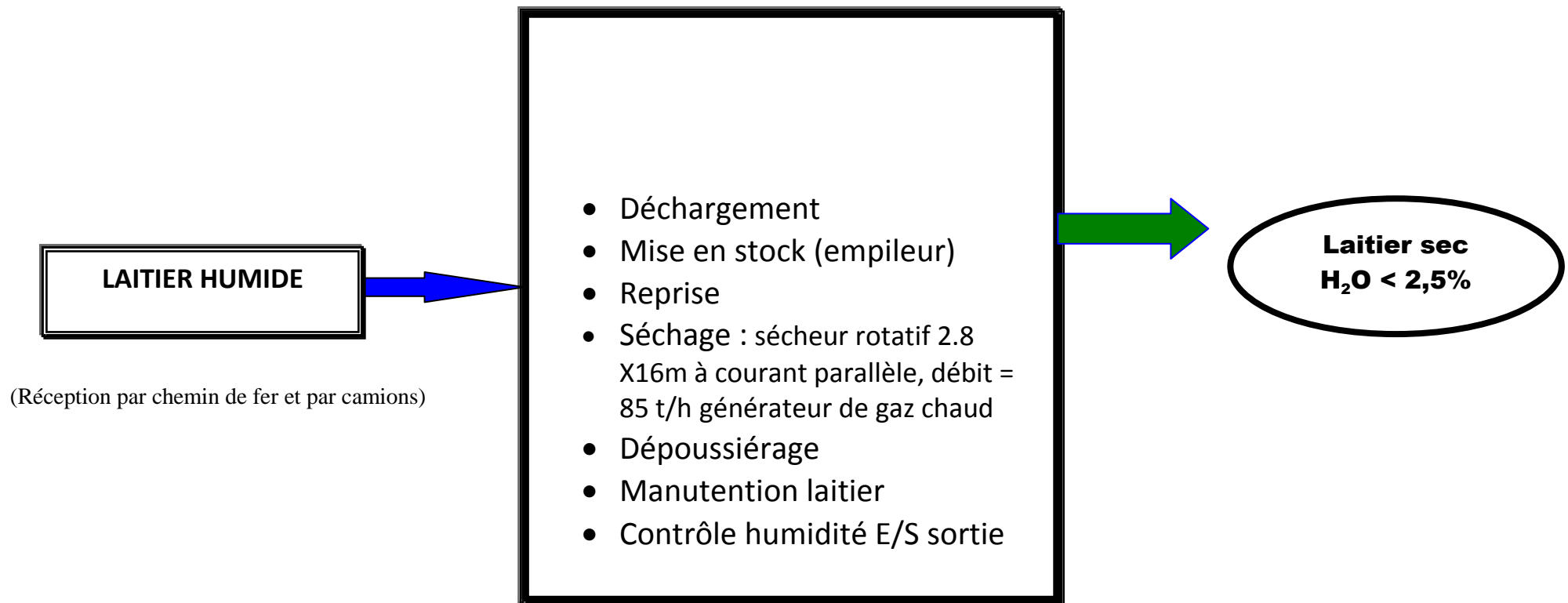
**5.2. Procédé de fabrication : Cuisson(Clinkérisation)**

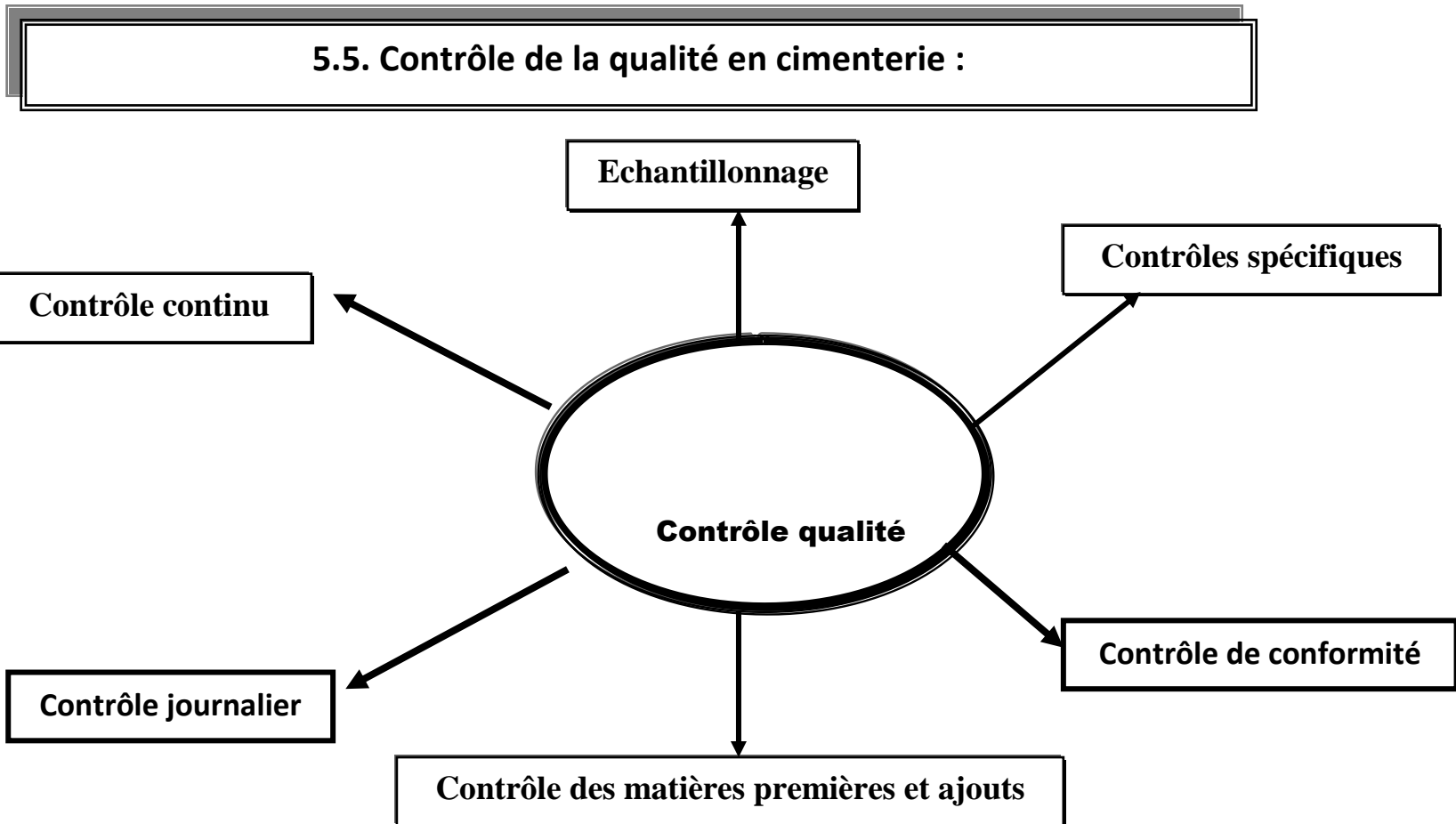


**5.3. Procédé de fabrication : Broyage clinker**



### 5.4. Procédé de séchage : Atelier de séchage laitier





## **6. Les différents types de déchets naturels employés dans les séchages :**

### **6.1. Farine de ciment (FC) :**

Les ciments de Hadjar-Soud sont fabriqués à partir d'un mélange de calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) environ de 80% et d'argile ( $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ ) environ de 20%. Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, oxyde de fer ou autres matériaux fournissant le complément requis d'alumine et de silice.

Le procédé de fabrication du ciment « laboratoire de société des ciments d'Hadjar-Soud, 2011 », consiste à « cuire », à haute température (1400 °C), un mélange de calcaire ( $\geq 70\%$ ), d'argile (18% -20%) et de minerai de fer (2% -3%). Le produit est convenablement dosé et broyé sous forme d'une « farine crue ».

Si le farine contient plus de 50% de magnésium, elle est éliminée du processus de fabrication de ciment. Ce déchet sera effectivement utilisé dans notre application en vue d'obtenir les mélanges aux boues de différentes siccités ci hautes rappelées.

### **6.2. Brique réfractaire (briques réfractaires magnésienne) :**

Une brique réfractaire est une brique qui conserve ses propriétés mécaniques à très haute température.

Les produits réfractaires résistent, par nature, aux températures élevées et sont utilisés pour la réalisation et la réfection de fours, de hauts fourneaux, de poches d'aciérie, de chaudières, chaufferies, brûloirs, foyers, feux ouverts, et conduits, de murs périphériques d'installations nécessitant la conservation de chaleur et la résistance aux températures élevées, éventuellement en parement adjacent ou non.

#### **6.2.1. Four rotatif :**

Le four constitue par une virole cylindrique de 90m de long et de 5.6m de diamètre protégé par de la brique réfractaire), incliné selon un angle de 1 à 4 degrés par rapport à l'horizontale

#### **6.2.2. Matériaux :**

Briques réfractaires à base de magnésie de fourneaux de cimenterie (en rebut après usage) :

La composition chimique de ce matériau est à base essentiellement de magnésie d'après les analyses du laboratoire de la société des ciments d'Hadjar-Soud, cette composition se présente comme suit :

- MgO% (teneur en Oxyde de magnésium 85-89)
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>% (teneur en Oxyde Aluminium oxyde (9-12)
- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> % (teneur en oxyde de fer 0.5)
- CaO % (environ Calcium oxyde 1.0)

Ces briques ont pour les besoins des essais été finement broyées à l'état de farine à dominance magnésienne (qu'on désignera par farine de brique réfractaires magnésienne (FBRM) [72].

### 6.3. Le Bois :

Le bois est une matière ligneuse et compacte et c'est aussi un matériau solide organisé et poreux, le bois se présente comme un ensemble de tissus cellulaires de consistance plus ou moins dure. Il forme la masse principale du tronc d'un arbre [73].

Sa structure complexe lui donne des propriétés mécaniques très intéressantes. En effet, c'est un matériau très utilisé en construction de bâtiment vu sa grande résistance à la compression. Le bois résiste plus selon la direction longitudinale et moins selon la direction radiale et tangentielle [74].

#### 6.3.1-Composition chimique du bois :

Comparé à d'autres combustibles, le bois est relativement riche en carbone, pauvre en oxygène. Il contient peu de matières minérales (cendres) et presque pas de chlore ni de soufre.

La composition du bois varie d'une espèce à une autre (tableau 03.) et dépend du milieu nutritif et climatique du lieu où a vécu l'arbre [74]

**Tableau N° 3** : Composition chimique du bois [73]

	Nature d'essence				
	Hêtre	Chêne	Bouleau	Tremble	Saule
<b>Carbone %</b>	48.89	50.64	50.61	50.31	51.75
<b>Oxygène %</b>	43.11	41.61	42.04	42.39	41.08
<b>Hydrogène %</b>	6.07	6.23	6.23	6.32	6.19
<b>Azote%</b>	0.93	1.08	1.12	0.98	0.98
<b>Autre %</b>	1	0.44	0.01	0.01	0.01

Nous pouvons proposer pour le bois en générale la composition moyenne suivante : 50% carbone, 42% Oxygène, 6% Hydrogène, et 1% Azote [74]

#### 6.4. Définition des trois déchets de l'usine de ciment de Hadjar-Soud :

Les déchets d'échantillonnage sont définis dans le tableau suivant :

**Tableau N°4** : Les déchets de l'usine de ciment de Hadjar-Soud.

Les déchets	Position par rapport à l'usine	Observations
Farine de ciment	Produit mal préparé.	Produit très fin (FC)
brique réfractaire finement broyée	Occupant la surface intérieure des fours.	Blocs qui résistent à des températures très élevés. Faire de broyage fin par le marteau doc manuelle (FBRfB)
les bois	L emballage des produits	broyage fin par machine de coupage (sciure de bois finement broyée « ScBFB »)

#### 7. Le matériel et procédé de préparation des matériaux pour le séchage

Le matériel utilisé pour la réalisation des expériences est composé de :

- Boîtes en plastique : Trente-huit boîtes de même volume (longueur 22cm, largeur 11cm et la hauteur 10cm) ont été utilisées pour assurer le séchage (Figure 27).



**Figure N°27** : Boîtes en plastique

- Thermomètre (Figure 28) : Il a été utilisé pour mesurer la température horaire durant toutes les expériences.



**Figure N°28**: Un thermomètre.

- Balance électronique : La balance (Figure 28A) a été utilisée pour mesurer les poids des différents échantillons de séchage (farine de ciment, bloc de calcaire et sciure de bois) et la boue.



Figure N°28A : Balance électronique

### 7.1-Procédé de fabrication des produits utilisés pour le séchage

#### a. Outils et équipement de mesures et de pesées :

- Des boîtiers en plastique de volume 22X11X10 cm<sup>3</sup> ont été employés pour le séchage des différents échantillons de mélanges des boues de la STEP et des déchets issus de la cimenterie mélanges ;
- Une balance électronique de précision
- Un thermomètre.

#### b. Boues de la STEP de Souk-Ahras et différents déchets de la cimenterie de Hadjar Essoud

- La boue brute : 400 g de boues (valeur constante) pour tous les essais ;

Les mélanges sont faits avec les déchets de farine de ciment et farine de briques réfractaire et sciure de bois finement broyée.

- Magnésienne, les poids varient en tranches de 50 (de 50 à 400 g) pour le (FC) (FBRB), les pourcentages des mélanges varient donc de 12,5 à 100%.et pour sciure de bois (10 à 80g ), les pourcentages des mélanges varient donc de 2,5 à 20%.

**Observation** : un échantillon témoin de boue brute seule est soumis à l'essai pour évaluer son temps de séchage, il sera pris à cet effet comme référence.

### c- Les conditions expérimentales :

Les mesures du degré de séchage ( ou de déshydratation) relatif à chaque mélange sont prises toutes les heures ; on note alors la quantité d'eau évaporée durant 12 heures (de 8 h à 20 h) jusqu'à l'ultime séchage ( final ) , on a remarqué que le temps de séchage variait entre 41h et 80h ; les mêmes mesures sont refaites le jour suivant et cela jusqu' au séchage complet (le nombre d'heures minimal et maximal enregistré était par conséquent respectivement de 41 et 80h.).

Observation : durant la nuit, les mesures de séchage ont été faites sur un intervalle de temps de 12h, la quantité d'eau perdue durant cette période nocturne restait au plus égale à la quantité maximale perdue en 1h en période diurne.



**Figure N°29** : Mélanges de boues aux déchets de FC et FBRM

## 7.2. Procédé de préparation des matériaux pour le séchage

Différents types de conteneurs sont utilisés dans le monde (pots en terre cuite, sachet en polyéthylène, godets, conteneurs WM, etc).

Dans notre cas, nous avons utilisé, au cours de nos essais, des boîtes en plastique dont les dimensions même volume (22cm X 11cm X 10cm) ont été utilisées pour assurer le séchage

Les mélanges utilisés sont composés de différent type des déchets de l'usine de ciment (FC, FBRFB et de ScBFB) et des boues résiduaire (siccité de 20 % et 30% et l'autre les boues de épaisseur donc la siccités de 0% ). Par cet essai, on cherche à identifier le mélange supposé optimal des boues aux matériaux localement disponibles et moins coûteux.

Les tableaux suivants donnent la dénomination et la composition des différents substrats testés.

**Tableau N° 5 : Dénomination et composition des substrats essayés (FC).**

Substrats	Boues (g)	Farine de Ciment (g)
S1	400	50
S2	400	100
S3	400	150
S4	400	200
S5	400	300
S6	400	400

**Tableau N° 6 : Dénomination et composition des substrats essayés de (FBRM)**

Substrats	Boues (g)	Farine de briques réfractaires magnésiennes (FBRM) (g)
S1	400	50
S2	400	100
S3	400	150
S4	400	200
S5	400	300
S6	400	400

**Tableau N° 7 : Dénomination et composition des substrats essayés de (ScBFB)**

Substrats	Boues (g)	sciure de bois (ScBFB) (g)
S1	400	10
S2	400	20
S3	400	30
S4	400	40
S5	400	60
S6	400	80

Les substrats ont été mélangés manuellement et mis dans des boîtes en plastique

### 7.3. Teneur en matières sèches ou siccité (MS) :

Cette mesure s'effectue par la mise en place de l'échantillon dans une étuve à 105°C durant 24 h. Connaissant la masse initiale et la masse finale après perte d'eau, la teneur en matières sèches est calculée.

La présente étude se base sur une siccité de 20% en mois de Décembre et 30% en Août.

#### 7.4. Mélanges et choix des substrats

Les mélanges utilisés sont composés de trois types des déchets de l'usine de ciment et des boues résiduaires (boues issues de l'épaississeur : siccités de 20% et 30%) ; il s'agit d'identifier le mélange supposé idéale (50 - 400g de FC et FBRM avec 400g de Boues). « BOUE/DECHETS » ayant donné le court temps de séchage naturel.

Les mesures du degré de séchage (ou de déshydratation des boues) relatif à chaque mélange sont effectuées au pas horaire ; la quantité d'eau évaporée est mesurée toutes les 12 heures (8 h à 20 h séchage) , le temps de séchage variait ainsi entre 41h et 80h ; les mêmes mesures sont refaites le jour suivant jusqu' au séchage complet (le nombre d'heures minimal et maximal enregistré était par conséquent respectivement de 41 et 80h.).

L'opération de séchage étudiée dans ce travail est opérée sur un échantillon de boue de l'épaississeur siccités 0 %, et de boue de siccités (20,30%.)

Le tableau 8 expose , selon la période et température d'essai, les temps de séchage obtenu pour les différents pourcentages de mélanges des boues issue de la STEP de la ville de Souk Ahras , avec les déchets de matériaux de cimenterie telle que la farine de ciment (FC) et la farine de briques réfractaires à base de magnésie (FBRM) et sciure de bois finement broyée (ScBFB) .

#### 8. Analyse et interprétation :

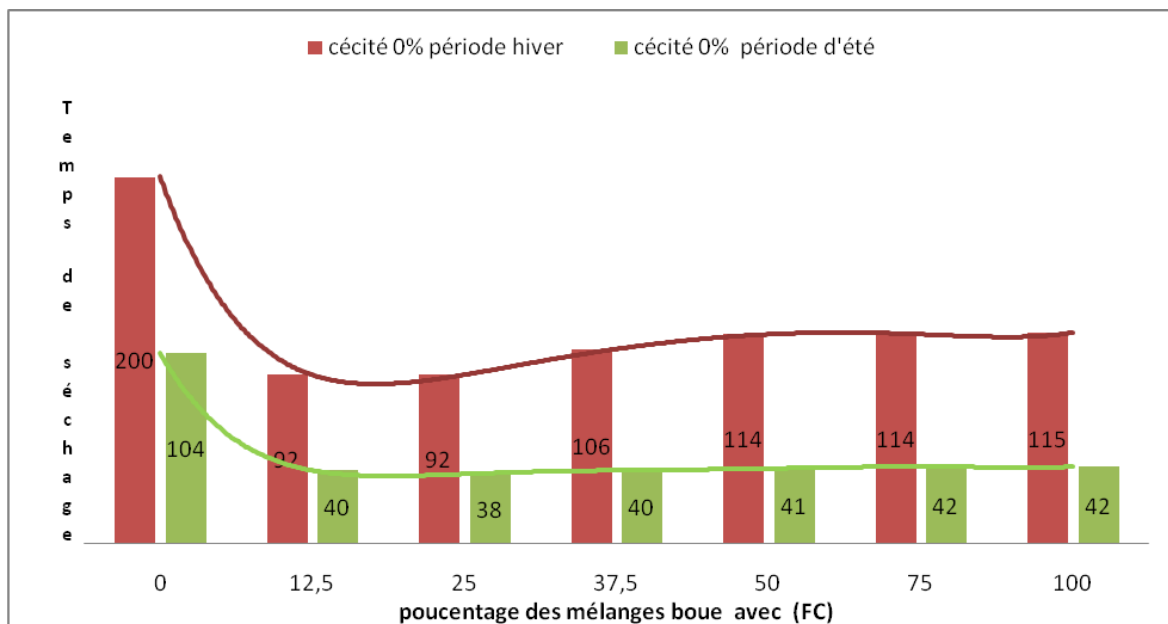
Les résultats seront ci-après interprétés selon les conditions expérimentales de pourcentages de mélange, de saison et de siccité des boues (tableaux 8).

**Tableau N° 8** : Siccités des boues, pourcentage de mélange de déchets de matériaux, période et température d'essai, temps de séchage

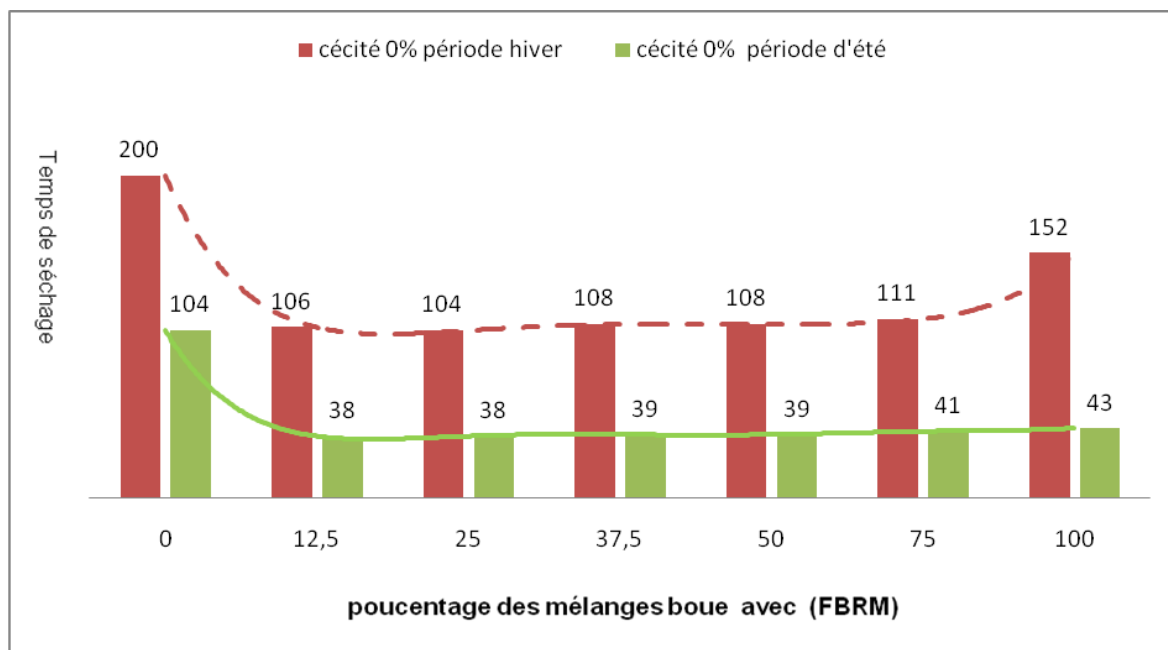
Siccité	Saison	Déchet de matériau De cimenterie de Hadjar Essoud	Mélange en déchets de matériau de cimenterie de Hadjer-Soud avec boue de STEP de la ville Souk Ahras								Observation : Temps de séchage en heures	
			0%	12,5 %	25 %	37,5 %	50 %	75 %	100 %	N° Ordre		
			Temps de séchage du mélange en heures								Min.	Max.
0%	Hiver (décembre) Températures moyen.16°C	Farine de ciment	200	92	92	106	114	114	115	1	92	200
		Farine de briques réfractaires magnésiennes (FBRM)	200	106	104	108	108	111	152	1	104	200
		sciure de bois finement broyée (ScBFB)	200	115	113	116	116	176	188	1	113	200
	Eté (aout) Température moyen. 34°C	Farine de ciment	104	40	38	40	41	42	42	2	38	104
		Farine de briques réfractaires magnésiennes (FBRM)	104	38	38	39	39	41	44	2	38	104
		sciure de bois finement broyée (ScBFB)	104	42	40	68	68	80	92	2	40	104
30%	Hiver (décembre) Températures moyen.16°C	Farine de ciment	176	107	106	113	128	152	164	3	106	176
		Farine de briques réfractaires magnésiennes (FBRM)	176	112	110	128	128	128	164	3	110	176
		sciure de bois finement broyée (ScBFB)	176	143	116	152	164	164	176	3	116	176
20%	Eté (aout)	Farine de ciment	80	42	41	42	68	68	68	4	41	80
		Farine de briques réfractaires (magnésiennes (FBRM))	80	42	40	42	42	42	42	4	40	80
		sciure de bois finement broyée (ScBFB)	80	41	68	92	92	104	104	4	41	104

**Tableau N° 9** : Evolution du temps de séchage en fonction du mélange FC et FBRM avec siccité 0% en période d'hiver et d'été

% Mélange	Siccité 0%	Siccité 0%	% Mélange FC et FBRM avec Boue	Siccité 0%	Siccité 0%
	Hiver	Eté		Hiver	Eté
	FC	FC		FBRM	FBRM
0	200	104	0	200	104
12,5	92	40	12,5	106	38
25	92	38	25	104	38
37,5	106	40	37,5	108	39
50	114	41	50	108	39
75	114	42	75	111	41
100	115	42	100	152	43



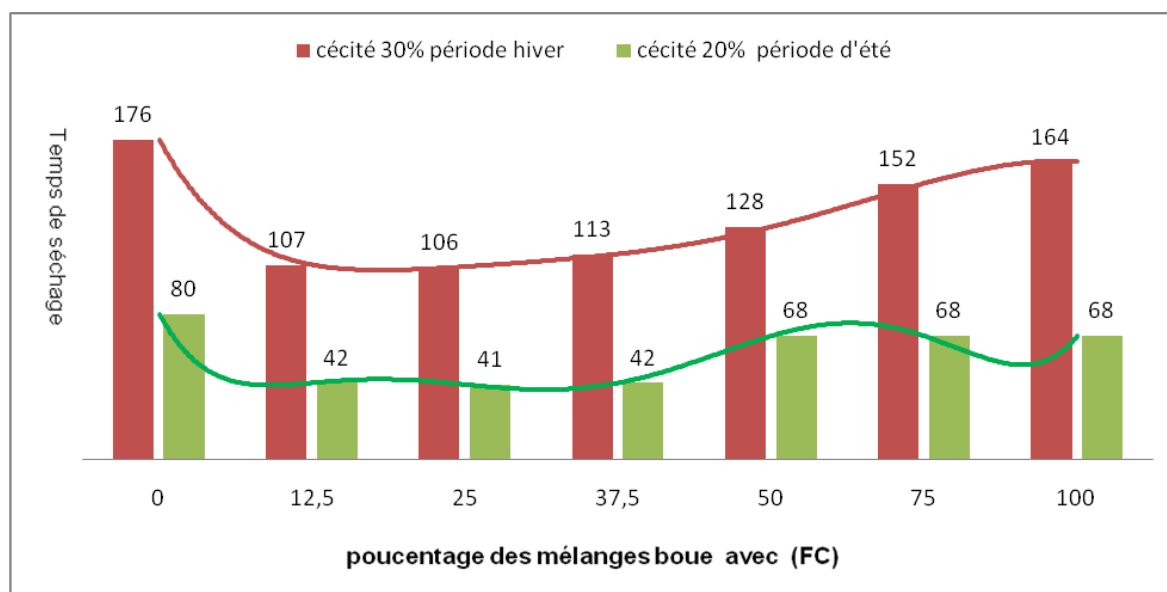
**Figure 30:** Evolution du temps de séchage en fonction du pourcentage du mélange (boue\_ farine de ciment): siccité 0% ; période hiver et été



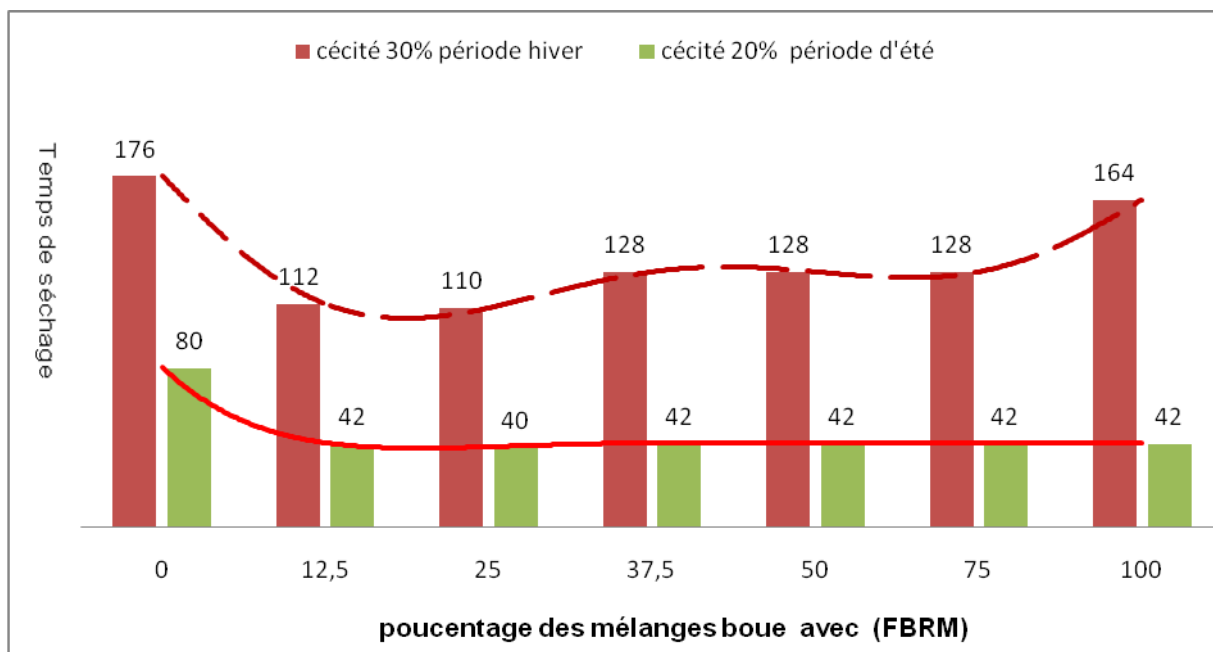
**Figure 31:** Evolution du temps de séchage en fonction du pourcentage de mélange « boue déchets de briques réfractaires finement broyées » : siccité 0% en période hiver et été

**Tableau N° 10 : évolution du temps de séchage en fonction du mélange FC et FBRM pour la Siccité de boue de 30% en période d'hiver et 20% en période et d'été**

% Mélange	Hiver	Eté	Mélange % de FC et FBRM avec Boue	Hiver	Eté
	Siccité 30%	Siccité 20%		Siccité 30%	Siccité 20%
	FC	FC		FBRM	FBRM
0	176	80	0	176	80
12,5	107	42	12,5	112	42
25	106	41	25	110	40
37,5	113	42	37,5	128	42
50	128	68	50	128	42
75	152	68	75	128	42
100	164	68	100	164	42



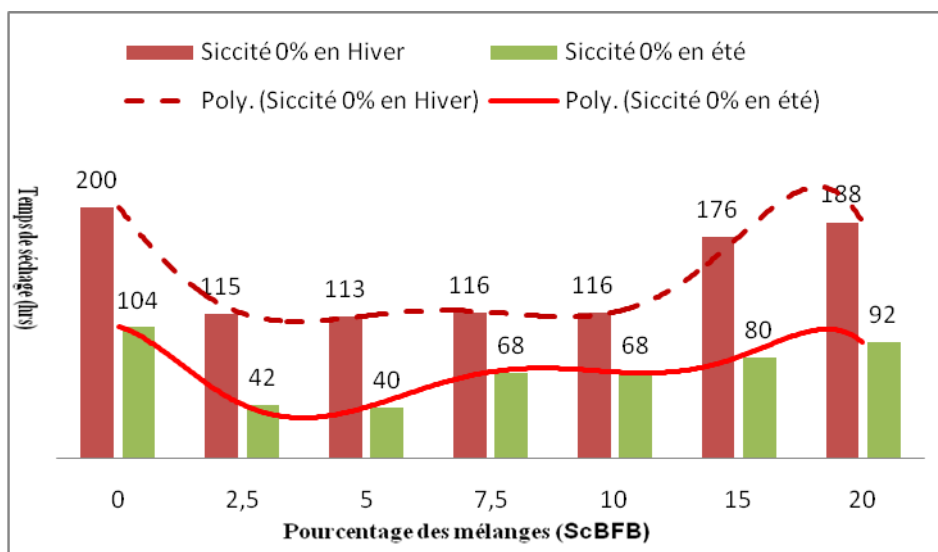
**Figure N°32: Variation du temps de séchage en fonction du pourcentage du mélange boue - farine de ciment: siccité 20% période d'été et siccité 30% période hiver**



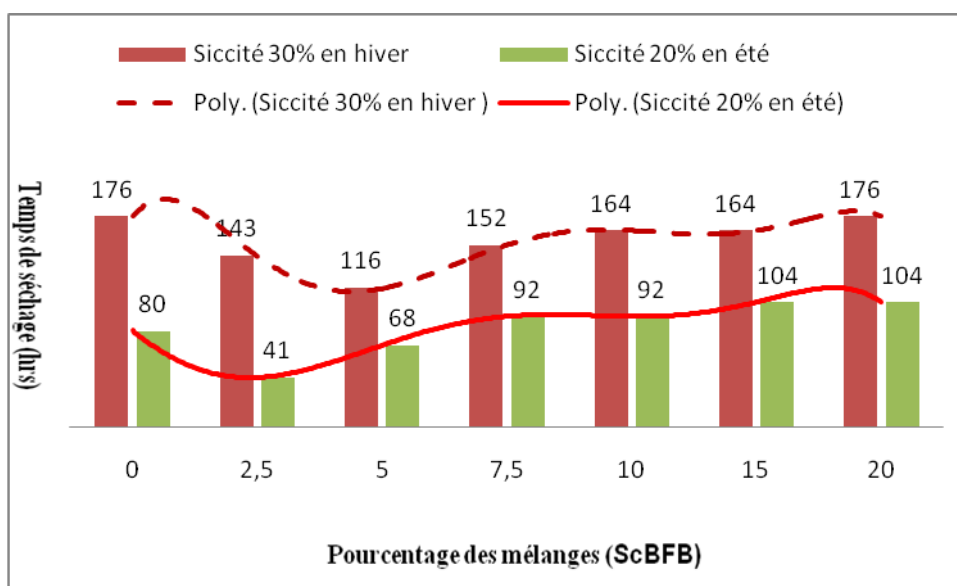
**Figure N°33:** Variation du temps de séchage en fonction du pourcentage du mélange de boue avec la farine de briques réfractaires magnésiennes FBRM de siccité 20 et 30%

**Tableau N° 11 :** Evolution du temps de séchage en fonction du pourcentage de mélange de la ScBFB avec boue de Siccité 0% en période d’hiver , 30% en période d’hiver et 20% en d’été

	Siccité 0%	Siccité 0%	% Mélange ScBFB avec Boue	Siccité 30%	Siccité20%
	Hiver	Été		hiver	été
% Mélange Boue_ ScBFB	Temps de séchage en heures			Temps de séchage en heures	
0	200	104	0	176	80
2,5	115	42	2,5	143	41
5	113	40	5	116	68
7,5	116	68	7,5	152	92
10	116	68	10	164	92
15	176	80	15	164	104
20	188	92	20	176	104



**Figure N°34:** Variation du temps de séchage en fonction du pourcentage du mélange de ScBFB avec boue de siccité 0% en période d’hiver et d’été



**Figure N°35:** Variation du temps de séchage en fonction du pourcentage du mélange de ScBFB avec boue de siccité 30% en hiver et 20% en été

Les histogrammes des figures 34 et 35 représentent la variation du temps de séchage en fonction du mélange de la ScBFB avec des boues de siccité :

1. 0% en période hivernale et d’estivale,
2. 30% en période hivernale et 20% en période estivale.

En période froide, le plus court temps de séchage de 113h, a été obtenu pour une «Boue de siccité 0%» mélangée à 5% de ScBFB (soit un poids de 20g).

Notons que le temps de séchage de la boue brute de STEP tend vers 200h.

En période d'été, pour une «Boue de 20% de siccité », le temps de séchage minimum est de 41h, correspondant à 2.5% de ScBFB / boue (soit 10g de ScBFB)

Il faut relever que le temps de séchage la boue brute de STEP enregistré est de 80h.

En période d'hiver, pour une «Boue de 30% de siccité », le temps de séchage minimum est de 116h, correspondant à 5% de ScBFB / boue (soit 10g de ScBFB).

Notons que temps de séchage pour ce type de boue de STEP est estimé à 176h.

### **8.1. Analyse d'impact éco environnemental:**

La préoccupation cardinale de cette contribution outre les aspects techniques relatifs au temps de séchage ci haut exposés, ne saurait occulter un aspect éco environnemental qui se fonde sur la gestion des 48000tonnes /an de boue brute produite par la filière boue de la STEP de Souk Ahras. Cette quantité de boue nécessiterait pour sa déshydratation et, si l'on retiendrait un mélange de 25%, quelques 11000 tonnes relatif à chacun des deux types de déchets (FC ou FBRM).

Cet objectif recommande d'initier une recherche d'outil technologique à l'effet de mettre en œuvre un moyen intégré pour la réalisation automatique ou hybride pour assurer un mélange homogène des « boues- déchets » sus défini.

### **8.2. Contraintes et perspectives du recyclage de FBRM :**

Pour l'usage dans le séchage des boues de STEP, la FBRM devrait subir obligatoirement une opération complexe de broyage fin, d'emballage adéquat pour un transport aux conditions réglementaires requises. Cette série opérationnelle annihilerait l'avantage attendu du recyclage de tout ou partie des 120t/an du déchet relatif à la FBRM, issu de la cimenterie de Hadjar-Essoud.

Nonobstant cette contrainte technico économique pour l'usage de ce déchet dans le séchage des boues de STEP, son intérêt pourrait par contre être suscité pour la production de matériau composite dédié au bâtiment et/ ou autres secteurs, cette suggestion pourrait susciter, une recherche appliquée dans le domaine de la science des matériaux.

**8.3. Les possibilités éco- environnementales de la farine de ciment (FC) :**

Ce déchet est estimé à 80000t/an d'où ne seront prélevés puis transportés que quelques 12000 t/an sur une distance de 150 km pour leur usage dans le séchage des boues de la STEP de Souk Ahras. En admettant un coût de transport peu prohibitif de ce déchet, son recyclage pour le séchage des boues, présenterait un avantage éco environnemental à même de répondre à l'objectif visé. Cette faisabilité pourrait s'étendre sur d'autre STEP telle celle de Skikda et de Annaba située respectivement à 30 et 40 km du site de la cimenterie de Hadjar- Essoud .

**Conclusion :**

L'expérimentation a porté sur trois cécités de boues :

- a- Cécité 0% c'est à dire boue à l'état liquide en période d'été et d'hiver
- b-Cécité 30% de siccité en période froide « mois de Décembre » ;
- c-Cécité 20% , en période chaude « mois d'Aout ».

Ainsi, dans cette approche de recherche expérimentale, les résultats obtenus montrent que le meilleur mélange pour chacun des deux déchets FCR et la FBRM, serait de 25% ; il faut relever que dans cette proportion de mélange :

En période chaude les boues étant de siccité 0% et 20%, le plus court temps de séchage moyen obtenu était de 1,5 jour .

En période hivernale, par contre pour une boue de cécité 0% et 30%, le plus court temps de séchage enregistré était compris globalement ente 4 et 5 jours , respectivement } pour la FCR et la FBRM.

Comparés à la situation d'état de fait, la réduction temporelle obtenue expérimentalement donnerait des rapports significatifs variant de 1/10 à 1/9 respectivement pour la période d'été et d'hiver.

Globalement ces résultats traduiraient, d'une part un recyclage de 14% de la farine de calcaire rebutée par la cimenterie et, d'autre part l'élimination en un temps optimal de la pollution générée par les boues sources potentielles de diverses nuisances.

L'intérêt étant, celui le l'usage exclusif de la farine de ciment, nonobstant cet avantageux « impact éco -environnemental », la mise en œuvre de technique appropriée pour son usage au niveau de la STEP nécessiterait, une étude de faisabilité technico économique appropriée.

# **Chapitre III**

***Caractéristiques et impacts éco***

***environnementaux des déchets des STEP***

**Introduction :**

L'usage des boues de STEP n'est point, contrairement à celui des fumures d'origine animale, une pratique coutumière chez les agriculteurs algériens. Toutefois, il faut relever les cas de l'usage limité des produits des STEP de : El-Athmania, Hamma Bouziane [75], Tipaza, Staouali[76], Sétif [77], Tlemcen [78], Touggourt [79], alors que par ailleurs, à travers le monde l'usage en agriculture, des eaux usées épurées et notamment les boues de STEP est législativement réglementé et se pratique à grande échelle Ainsi, en Grande Bretagne les 2/3 des boues produites sont recyclés en agriculture [80].

Des travaux ont été entrepris par des chercheurs universitaires algériens [69], [70], [78] et [79] ; des essais expérimentaux ont de ce fait été tentés dans la réutilisation des eaux usées épurées et des boues de STEP en agriculture [77], Pomme de terre et courgettes [80]. Les amendements organiques à base de boue résiduaire s'avèrent efficaces eu égard à la production des cultures [80]. Les applications répétées de déchets municipaux et des boues d'épuration constituent un facteur déterminant dans l'amélioration des propriétés physiques des sols [81] et [82].

Ces déchets contribuent est notamment à l'augmentation du taux de matière organique des sols [81]. Toutefois, l'épandage des boues sur le sol et l'irrigation des cultures par les eaux usées épurées de STEP, bien que leur valeur agro-pédologique soit prouvées, restent conditionnés par leur innocuité vis-à-vis du sol et des eaux [83] et [84] en outre les auteurs de ces références, rapportent que la réutilisation des eaux usées épurées pour l'irrigation et des boues comme fertilisants en agriculture (cultures maraîchères) ne causerait pas de problèmes pour l'homme et l'environnement.

En comparaison à d'autres substrats, l'influence de l'apport de boues de STEP sur les propriétés physiques d'un sol et leur contribution aux rendements de la culture de pomme de terre a été bien mis en évidence par Dridi B. [84]. D'après Zebarth et al, Su et al. etWarman et al. [85] [86] et [87]. Les boues, selon la dose appliquée, peuvent couvrir, en partie ou en totalité, les besoins des cultures en azote, en phosphore, en magnésie, calcium et en soufre ; elles peuvent aussi corriger des carences à l'exception de celle due au potassium. [88].

De nombreuses études ont été menées sur l'épandage des boues d'épuration et l'irrigation par les eaux usées, nous citons pour l'exemple : Bahri A. et Houmane B. [89], qui ont montrés que l'épandage d'eaux usées traitées (600 mm) et de boues résiduaire(30 t/MS/ha/an) durant deux années sur un sol sableux a entraîné des variations importantes de la composition chimique du sol.

Ces auteurs auraient alors enregistré une augmentation de la teneur en sels, en éléments fertilisants (N, P, K) et en certains éléments traces (Cu, Pb, Zn).

Les résultats des amendements organiques à base de boue résiduaire indiquent une augmentation de la production des cultures fourragères dont le rendement aurait varié sensiblement de 100 à 250% ; l'apport 30 t de MS/ha de boue résiduaire, s'est donc révélé aussi efficace que l'apport de 66 kg ha<sup>-1</sup> d'azote minéral [90].

Les déchets des STEP qui présentent un intérêt économique nonobstant leur impacte environnemental sont essentiellement les eaux usées épurées et les boues stabilisées.

## 1. Les eaux usées :

### 1.1. Origine et qualité des eaux usées :

La pollution d'une eau usée peut être générée par diverses sources : rejets domestiques industriels et/agricoles, ruissellement et infiltration,... Cette pollution peut être quantifiée par des caractéristiques physiques (MES, odeur,...), chimiques (DCO, DBO<sub>5</sub>, Azote Kjeldahl, azote minéral, teneur en phosphate, teneur en matières toxiques,...) et biologiques (bactéries, virus,...).

La notion d'équivalent habitant, représentant la charge moyenne rejetée par habitant et par jour, a été introduite pour caractériser globalement les rejets d'eaux usées par jour et par habitant.

### 1.2. Qualité des eaux usées de la STEP de Souk Ahras :

Le tableau suivant expose les paramètres présentant les caractéristiques suivantes :

**Tableau N°12 :** Résultats de l'analyse des eaux usées à l'entrée et sortie de STEP Souk Ahras

STEP Souk Ahras	pH	TC <sup>0</sup>	MES (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DCO (mg/l)	NT (mg/l)	NH <sub>4</sub> (mg/l)	PO <sub>4</sub> (mg/l)
<b>Entrée</b>	8.50	11.47	310.3	161.3	350	29.8	24.2	6.55
<b>Sortie</b>	8.31	10.3	19.17	5.1	31.7	18.07	7	2.58

### 1.3. Les métaux lourds dans les eaux usées de STEP

**Tableau N°13 :** Résultats de l'analyse des eaux usées des métaux lourds (entrée et sortie de la station d'épuration de Souk Ahras)

Elément	Entrée (mg/l)	Sortie (mg/l)	Limites normative (mg/l)	
			A court terme	A long terme
<b>Cd</b>	0.483	0.083	0.05	0.01
<b>Pb</b>	5.48	0.95	10.0	5.0
<b>Zn</b>	0.45	0.02	10.0	5.0
<b>Cu</b>	4.8	0.63	5.0	0.02
<b>Chrome</b>	Très bas	Très bas	1.0	0.1

Source [91]

Tableau N°14 : Normes pour eaux usées

T(°C)	pH	MES (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DCO (mg/l)	Cd (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)	Chrome (mg/l)	Cuivre (mg/l)
30	6.5-8.5	35	35	120	0.20	0.50	0.3	0.5	0.5

Source [91]

## 2. Les boues des STEP :

### 2.1. Caractéristiques et devenir :

La production de boues d'épuration en constante augmentation, en France, elle est estimée, à l'horizon 2005 à 1.300.000 tonnes de matière sèche par an, la production européenne était alors de 15-20 millions de tonnes de MS.

Actuellement, en Algérie, la production des boues des 165 STEP est estimée à 250.000 tonnes par an ; à l'horizon 2020, elle atteindra les 400.000 tonnes par a [92].

Les projections d'évolution de cette production sont, liées à la croissance démographique et progrès du système national d'assainissement des eaux usées et de sa généralisation comme le préconise la politique nationale de l'environnement traduite par les orientations du plan bleu sous tendu par la **directive 91/271/CEE définissant** les normes minimales requises pour le traitement des eaux résiduaires.

Ce renforcement réglementaire est également à l'origine de la diminution du nombre d'alternatives pour l'élimination des boues : interdiction du rejet en mer des boues depuis 1998, réduction progressive de la mise en décharge des boues, initialement prévue à partir de juillet 2002, puis reportée à 2015. Les principales voies d'élimination et de valorisation se limitent donc à la mise en décharge, l'incinération, et la valorisation organique.

Selon les estimations les plus récentes en France, 55 à 60 % de la production de boues sont valorisés en agriculture, 25 % sont mis en décharge et moins de 20 % sont incinérés. [93].

### 2.2. La mise en décharge :

C'est le procédé le moins avantageux écologiquement, car il est responsable de dégagement gazeux toxique à effet de serre. Les «Lixiviats » peuvent percoler dans les nappes phréatiques. Les boues doivent avoir une teneur minimale de 30 % de MS pour être stockées en décharge.

Ce procédé, amené à disparaître, sera réservé aux seuls déchets ultimes. Il reste cependant le procédé le plus utilisé en Grèce et en Italie qui procèdent au stockage respectivement de 90 et 81 % de leur production en boues [94].

## **2.3. L'incinération :**

### **2.3.1. Les techniques d'incinération des boues :**

Cette technique est la plus coûteuse ; elle peut se faire avec ou sans valorisation énergétique. L'incinération concerne les grosses agglomérations, les collectivités où l'épandage des boues est concurrencé par l'épandage des déchets organiques d'origine agricole ainsi que ceux des collectivités à caractère touristique. Son bilan écologique n'est pas intéressant, car il est à l'origine de pollution atmosphérique.

Plusieurs types d'incinérations coexistent dont l'incinération spécifique et la co-incinération. Cette dernière consiste à incinérer des boues usées urbaines et des ordures ménagères. D'autres traitements thermiques alternatifs tels que l'incinération en cimenterie, l'oxydation par voie humide (oxydation sans flamme à basse température 230°C et forte pression 30 bars en présence d'un gaz oxydant pendant 30 min) et la thermolyse / pyrolyse des boues (chauffage en atmosphère réductrice à une température comprise entre 400 et 700°C) sont actuellement en cours d'étude [95]. L'incinération est la principale destination des boues (55 % de la production) en Suisse [96].

### **2.3.2. Les risques sanitaires liés à l'incinération des boues :**

Les germes pathogènes sont détruits par la chaleur et ne représentent donc pas de risque pour la population. Les risques sanitaires liés à la voie respiratoire des populations paraissent faibles, selon l'avis d'expert ("L'incinération des déchets et la santé publique ", Société Française de Santé Publique, 11/1999) [97].

Mais néanmoins on peut émettre des réserves quant aux effets à long terme, notamment en ce qui concerne les métaux et les dioxines, les risques sanitaires semblent être fortement liés à la technologie utilisée pour l'incinération des boues urbaines. Citons, à titre d'exemple, les technologies modernes de four à lit fluidisé qui permettent de réduire fortement le risque d'émissions de dioxines ou de furanes touchant essentiellement la population par l'intermédiaire de la chaîne alimentaire. [97]

## **2.4. L'épandage des boues:**

### **2.4.1. L'épandage sur les sols agricoles :**

C'est le moyen le plus économique et le plus écologique. Parmi les sous-produits issus du prétraitement des eaux usées, seules les boues peuvent faire l'objet d'un recyclage. Les refus de dégrillage, les matières de dessablage et les matières grasses de dégraissage-déshuilage sont récupérés et sont soit incinérés, soit acheminés dans les déchetteries municipales, soit utilisés comme remblais.

L'épandage agricole représente en moyenne 40 % de la production européenne (en tonnage). C'est en Belgique et au Danemark que cette pratique est la plus répandue avec 90 et 67 % de la production de boues épandue [94]. Aux Etats-Unis, en 1995, les épandages de boues représentés plus de 25 % de la production nationale. Ce pourcentage peut même atteindre 70 % dans certains états comme le Colorado, la Floride ou encore Washington [96].

L'épandage en milieu agricole est la solution privilégiée dans les principes de la politique européenne de gestion des déchets. Certains pays y sont favorables sous réserve de critères de qualité stricts comme l'Allemagne, le Danemark, la Finlande, l'Autriche et la Suède. L'épandage des boues dans les pays du sud de l'Europe, comme l'Italie, l'Espagne, le Portugal, la Grèce, ne suscite pas de débats. La région des Flandres (Belgique) et les Pays-Bas sont quant à eux défavorables à l'épandage. La position de la France est intermédiaire en termes de pratiques d'épandage, de quantité épandue et d'exigence réglementaire.

L'épandage des boues représente un amendement organique permettant d'entretenir la fertilité des sols tout en évitant le recours à des solutions uniquement éliminatrices qui, selon l'audit comparatif 1999 réalisé par le cabinet Arthur Andersen pour les Agences de l'eau [94], présentent des impacts défavorables sur l'environnement. Les boues épandues peuvent être liquides, pâteuses, solides, chaulées ou compostées. La réglementation prévoit deux grandes périodes d'épandages : le printemps (mars-avril) et à la fin de l'été (août-octobre). L'épandage en dehors de ces périodes étant interdit, les boues qui continuent à être produites sont stockées. Leur stockage et leur épandage sont également soumis à une réglementation précise.

Les voies d'élimination diminuant et la valorisation agricole des boues se heurtent à une opinion publique et à des agriculteurs de plus en plus réticents, des alternatives à l'épandage classique se développent.

#### **2.4.2. L'Épandages sur les sols non agricoles :**

Se pratique sur les sols forestiers ou sur les sols dégradés (carrière, mines désaffectées, forêts débroussaillées, etc.) en vue d'une revégétalisation ou encore sur les espaces de loisirs.

La revégétalisation est un mode de valorisation particulièrement important en Suède où plus de 20 % des boues sont concernés. Elle se pratique également en Finlande, en Espagne et en Grande Bretagne. Les boues d'imprimerie sont également utilisées dans ce domaine [98]. Les épandages en milieu forestier sont pratiqués depuis plus de 20 ans aux Etats-Unis, surtout dans les états du sud-est et de la côte ouest [98].

### 2.4.3- Valorisation des boues en agriculture :

Les boues sont utilisées comme matière première pour la fabrication d'engrais ou d'amendements calcique et organique. Les composts, issus du mélange des boues d'épuration et des déchets verts, des écorces, etc., sont actuellement une des voies les plus prometteuses. En effet, le compost a un effet amendement par l'apport d'humus, un effet engrais et un effet bi stimulant, en étant support et aliment de l'activité biologique. Alors que la directive relative à l'utilisation de ces composts est en cours d'homologation au niveau européen, certains composts sont commercialisés aux Etats-Unis depuis plusieurs années, comme les Mil organites, dérivés des boues de Milwaukee, et la Nitrohumus, utilisant les boues de Los Angeles [96].

Les boues peuvent également être déshydratées et utilisées sous la forme de granulés [99]. Cette pratique est plus répandue dans le nord de l'Europe (Danemark et Suède). Ces boues présentent l'avantage d'avoir un contenu en métaux lourds et en azote moins élevé que dans les boues non asséchées [100].

### 2.5. Impact des boues sur l'environnement :

Le fait d'apporter des boues dont la qualité chimique et organique est différente de celle du milieu récepteur entraînerait les modifications de ce milieu [101]. L'épandage de boues de station d'épuration peut, en effet, modifier les propriétés du sol [102]. Ces modifications peuvent être d'ordre édaphique (par l'apport de matière organique, modification de la structure), microclimatique (augmentation de la température au cours de la fermentation), floristique (installation d'une végétation rudérale).

#### 2.5.1. Réactions physico-chimiques :

Par leur composition, ces boues peuvent avoir des effets bénéfiques sur les propriétés chimiques et physiques du sol. Les modifications de la physique du sol vont essentiellement dépendre de son mode d'introduction et des propriétés du sol récepteur. Si les boues sont introduites par aspersion, les boues restent à la surface du sol et les propriétés du sol s'en trouvent peu modifiées.

Cependant, si le sol a des propriétés de transfert relativement importantes, les migrations de l'eau et d'un certain nombre de solutés pourront être plus profondes. Si le sol est peu perméable ou se trouve dans des conditions de stress hydrique au moment où il pleut, le ruissellement l'emporte de loin sur la pénétration dans le sol [101].

L'épandage des boues a pour principal but d'augmenter le rendement des cultures.

Les boues ont la capacité de restituer au sol des éléments structurants et fertilisants. Elles contiennent, en effet, des nutriments pour les cultures et servent d'amendement calcique et

organique pour améliorer les propriétés physiques et chimiques du sol, surtout si ces boues sont chaulées ou compostées. Les microorganismes présents en grand nombre dans le sol digèrent, en partie, les matières organiques apportées par les boues et les transforment en éléments minéraux disponibles pour la plante. Une autre partie des matières organiques est incorporée au sol et contribue à l'entretien d'une structure favorable au développement des racines [103].

Les boues ont une incidence directe, plus ou moins durable, sur la structure du sol [104]. L'apport de boues augmente la compaction du sol [105], qui devient plus résistant à la destruction par l'eau. Les composés organiques apportés ont une action anti-mouillante [104].

Elles améliorent l'agrégation du sol et sa stabilité [107, 106, 109,110]. La perméabilité du sol augmente, induisant une augmentation de la conductivité hydrique et de la vitesse d'infiltration de l'eau [111]. D'autres paramètres, tels que la capacité de rétention en eau [105, 108, 102,112], la conductivité électrique [108, 112,113]. Et la porosité du sol [108, 102, 105, 113] est également améliorée suite à l'application de boues ou de composts.

La fertilité instantanée et les propriétés physiques du sol, améliorées par l'application des boues, interfèrent sur la production des espèces herbacées et diminuent, ainsi, le taux d'érosion.

D'un point de vue chimique, outre l'apport de matière organique et d'azote, ces boues et composts améliorent, entre autres, la capacité d'échange cationique [113]. L'application de boues chaulées réduit l'acidité des sols trop acides. Elle réduit également la battance des sols limoneux et améliore la structure du sol.

### 2.5.2. Réactions biologiques :

Par l'apport de matière organique, l'application des boues peut également avoir un effet indirect sur le comportement biologique en stimulant les populations microbiennes et d'invertébrés dont le rôle dans le fonctionnement du sol est primordial. De nombreuses études ont, en effet, montrées que l'application de boues a, en général, un effet bénéfique sur la biomasse microbienne et sur son activité dans le sol [108, 134, 107, 114,115]. Mais, d'autres résultats ont montré que parallèlement à cette augmentation de biomasse, on observait des changements dans la structure de la communauté qui se traduisaient par une diminution de la diversité spécifique et fonctionnelle. Ces résultats sont d'autant plus prononcés que les boues sont contaminées avec une quantité importante de métaux lourds [116].

D'une manière générale, l'apport de nutriments qui accompagne l'application des boues d'épuration favorise les invertébrés et l'abondance des collemboles [117, 118], des carabidés, des vers de terre [109, 119], des nématodes du sol et des acariens [120].

### 2.5.3. Risques sanitaires de l'épandage des boues:

Depuis plus de 30 ans, des boues d'épuration municipales sont épandues en France sur des terres agricoles. Aucun accident portant atteinte à la santé publique n'a été enregistré à ce jour.

Il faut également savoir que les boues urbaines représentent moins de 2% des déchets épandus en agriculture (les déjections animales en représentent 94%).

Il est important de souligner que les risques de contamination par la consommation de produits animaux (épandage sur pâturages passant par l'animal par ingestion directe) existent bel et bien pour les composés qui ont tendance à s'accumuler dans les graisses animales (graisse, lait),

Aujourd'hui, FNE privilégie la filière de l'épandage compte tenu des besoins en matières organiques des sols et rappelle que les amendements de type potassium par exemple, vendu couramment dans le commerce, ne sont pas exempts de métaux lourds.

Pour conclure, de nombreuses incertitudes scientifiques règnent dans le domaine des boues de STEP, notamment sur l'éventuel risque sanitaire lié à la mise en décharge et même sur les résidus de polluants dans les boues. La réduction, voire la diminution, des rejets ou des entrées de micropolluants dans le réseau d'assainissement doit être le fer de lance en ce qui concerne la problématique des boues. Le principe de la réduction à la source apparaît donc comme l'approche essentielle à privilégier pour garantir la diminution des risques sanitaires des différentes filières d'élimination des boues urbaines. Les quantités de boues sont en augmentation et cela va se poursuivre. Ceci est le résultat de l'amélioration de la dépollution des eaux usées avant leur rejet dans la nature.

### 2.6. Composition des boues

La composition des boues varie en fonction de l'origine des eaux usées, de la période de l'année et de type de traitement et de conditionnement pratiqué dans la station d'épuration [121].

Les boues des stations d'épuration sont constituées généralement de :

- Particules minérales (argiles, carbonates, silicates, phosphate...);
- Débris organique grossiers (fibres textiles, résidus végétales, matières plastiques);
- Biomasse morte (résidus de cellules bactérienne, d'algues...);
- Polymère organique issu de l'activité de biomasse (polysaccharides, protéines...);
- Constituants minéraux et organiques solubles.

Par leur composition, les boues utilisées en agriculture augmentent le rendement des cultures. Elles contiennent des nutriments qui servent d'amendement organique et calcique pour améliorer les propriétés physicochimique du sol [122]

En générale, Trois sortes d'éléments sont présents (ou susceptibles de l'être) dans les boues

- Des éléments utiles,
- Des éléments indésirables,
- Des micro-organismes pathogènes.

**Tableau N°15 : Caractéristiques Les éléments fertilisants dans les boues résiduaires 123]**

Elément	Azote	Phosphore	Potassium	Matière organique
<b>Boues fraiche</b>	3.5	2	0.5	60
<b>Boues digérées</b>	2	1	0.2	40

Les qualités varient d'une boue à l'autre selon l'origine et le mode de traitement.

**Tableau N°16: Résultants des analyses chimiques des métaux lourds pour les boues de STEP**

Les échantillons \ ETM (mg/l)	Plomb (mg/l)	Cadmium (mg/l)	Cuivre (mg/l)	Zinc (mg/l)	Chrome (mg/l)
<b>Boues</b>	1,27	1,93	97,9	65,83	12,98

**Tableau N°17 : Limite de qualité des boues admises à l'épandage agricole [124]**

	Teneur limite réglementation française (mg/kgMs) Arrêté 08/01/98	Teneur limite Directive 86/278 (mg/kgMS)
<b>Cd(Cadmium)</b>	10	20 à 40
<b>Cr(Chrome)</b>	1000	-
<b>Cu(Cuivre)</b>	1000	1000 à1750
<b>Hg (mercure)</b>	10	16 à25
<b>Ni (nickel)</b>	200	300 à 400
<b>Pb (plomb)</b>	800	750 à1200
<b>Zn(zinc)</b>	3000	2500 à 4000
<b>Cr +Cu + Ni + Zn</b>	4000	

**Tableau N°18 : Flux limites sur 10 années en ETM apportés par les boues (cas général) [124]**

	Flux limites réglementation française Arrêté 08/01/98 (mg/kg/10 ans)	Flux limite selon Directive 86/278 (mg/kg/ 10ans)
<b>Cd(Cadmium)</b>	0.15	1.5
<b>Cr(Chrome)</b>	15	-
<b>Cu(Cuivre)</b>	15	120
<b>Hg (mercure)</b>	0.15	1
<b>Ni (nickel)</b>	3	30
<b>Pb (plomb)</b>	15	150
<b>Zn (zinc)</b>	45	300

**Conclusion :**

La valorisation agricole des boues résiduaires peut être considérée comme le mode de recyclage le plus adapté pour d'une part, rééquilibrer les cycles biogéochimique (N, K, P...) et d'autre part assurer tant soit peu, la protection de l'environnement. Les boues constituent un fort intérêt économique. [27], car elles contiennent la plupart des éléments présents dans les engrais de synthèse [6], **et constituent** par conséquent un réservoir nutritionnel fort appréciable pour l'usage agronomique

# **Chapitre IV**

***Caractéristiques physico-chimiques du sol***

**Introduction :**

Les qualités physiques et chimiques un substrat sont très importantes il, doit être perméable tout en ayant une bonne rétention en eau, il doit aussi conserver sa structure dans le temps [27].

**1. Les paramètres physiques et chimiques :****1.1. La température C° :**

Les températures constituent l'autre élément majeur conditionnant le climat d'une région. La quantité d'eau évaporée est fonction de la température de l'atmosphère [125].

**La température :** n'a qu'un effet direct négligeable sur la mobilité des paramètres chimiques Mais, en présence de matière organique, elle peut avoir un rôle indirect, par exemple en augmentant sa dégradation, ce qui peut produire des substances acides et complexent [126].

**1.2. Le pH**

La concentration du milieu en ions H<sup>+</sup> détermine sa réaction mesurée par le pH.

Les différentes classes du pH sont représentées dans le tableau suivant.

**Tableau N°19 :** Echelle de classification du pH de la solution du sol [127]

pH	5-6.5	<3.5	3.5-4.2	4.2-5	6.5-7.5	7.5-8.7	>8.7
Classes	Hyper Acide	Très acide	Acide	Faiblement acide	Neutre	Basique	Très basique

Le pH a une incidence sur la facilité du plant à se nourrir, il influe aussi sur la contamination par divers champignons, un milieu trop acide peut être à l'origine debrulures des racines [128].

Le pH peut influencer d'une façon très marquée l'assimilabilité et par suite, l'absorption des éléments traces par les plantes [129].

Ces métaux lourds sont d'autant plus solidement liés et par conséquent moins obiles et disponibles que le pH est élevé. Un pH bas, inférieure à 5, limite la croissance de la majorité des plantes, induisent le symptôme de carences en calcium, à l'exception des plantes calcifuges dites de « terre bruyère » qui exigent un milieu acide sans calcaire.

Un pH supérieur à 8, est également préjudiciable à la croissance d'un grand nombre des végétaux entraînant une mauvaise assimilation de certains éléments (dont le Magnésium et surtout le Fer), qui entraîne les symptômes bien connue de la chlorose ferrique [130].

D'après [131], le substrat doit présenter un pH compris entre 5 et 8, en dehors de es limites, le plant sera confronté à des problèmes de nutrition minérale.

Un pH voisin de 7 est souhaitable, est peut convenir à toutes espèces. L'élévation du pH diminue l'assimilabilité du phosphore (devient insoluble), de même le calcaire bloque la minéralisation de la matière organique et donc diminue la disponibilité en éléments nutritifs pour les plantes. Dans les sols acides, il peut y avoir une libération de l'aluminium qui est toxique pour les plantes. Les symptômes de carence ou excès en éléments minéraux, la non satisfaction de la plante vis-à-vis de sa nutrition, va ralentir sa croissance ou perturbe son développement.

A l'extrême tout excès ou carence peut provoquer des symptômes parfaitement isibles.

### 1.3. La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique donne une idée sur la salinité du milieu. Lorsque la concentration saline de la solution aqueuse d'un sol est trop élevée, les racines se développent mal et la croissance de la plante est ralentie, on aboutit même dans les cas graves, au dépérissement des plantes

**Tableau N°20** : Classification des sols en fonction de la CE et de la somme des anions [130].

Classe	Désignation	Conductivité électrique (mmhos /cm à 25°C)	Somme des anions (mé/l)
0	Non salé	<2.5	<25
1	Faiblement salé	2.5-5	25-50
2	Moyennement salé	5-10	50-105
3	Salé	10-15	105-165
4	Fortement salé	15-20	165-225
5	Très fortement salé	20-27.5	225-315
6	Excessivement salé	27.5-40	315-620
7	Hyper salé	>40	>620

### 1.4. La matière organique (MO)

La matière organique joue plusieurs rôles :

- Contribue et facilite l'obtention d'un état structural stable [132], [133], [134]
- Une meilleure porosité, bonne perméabilité, meilleure aération et un meilleur réchauffement du sol. [135].
- Joue un rôle important dans la rétention en eau [133] Sous l'action des microorganismes du sol, elle libère les éléments minéraux qui sont indispensables à la nutrition et au développement des plants [136].
- Elle joue un rôle dans la mobilité et la disponibilité des métaux lourds dans le sol [137].
- La matière organique des sols se caractérise, comme les argiles, par une grande surface spécifique et par son pouvoir gonflant, permettant la pénétration de l'eau et la diffusion de molécules de petites tailles qui peuvent ainsi se lier avec les substances humiques [138].

### 1.5. Les éléments chimiques nutritifs majeurs :

Tous les éléments nutritifs nécessaires aux développements des plantes sont absorbés sous formes minérales. Environ 16 éléments sont reconnus indispensables au développement des plantes vertes, ses éléments indispensables, sont subdivisés en deux groupes :

- Les éléments majeurs (macroéléments) forment environ 99% de la matière sèche végétale.
- les oligo-éléments (micro éléments) absorbés en quantité infimes représentent 1% de la matière sèche végétale.

L'insuffisance d'un élément assimilable dans le sol réduit l'efficacité des autres éléments, et par la suite le rendement [139], De même l'excès ou le déficit du sol en certains éléments nutritifs, et particulièrement les oligo-éléments, peut se manifester par des phénomènes de toxicités ou de carence des végétaux (Mn, Cu,..). Parmi les éléments chimiques les plus importants (nutritifs majeurs) sont :

#### 1.5.1. Potassium (K) :

Le potassium n'est pas très mobile dans la plante, il joue un rôle important dans les mécanismes de la photosynthèse, lors de la migration des sucres, la synthèse des matières azotées, l'économie de l'eau, la résistance aux froids, la résistance aux maladies cryptogamiques.

(<http://fr.wikipedia.org/Fertilisation>). Une insuffisance en potassium provoque des chloroses puis brunissement des bords du limbe des feuilles de base, pouvant s'étendre entre les nervures et évoluant vers la nécrose, la tige devient mince et faible [140].

L'excès du potassium provoque des nécroses au niveau de la racine et une faible croissance [141]. Cette référence signale que l'estimation de l'aptitude d'un sol à assurer l'alimentation des cultures en potassium doit être associées au taux d'argile et à la valeur de la CEC.

#### 1.5.2. Calcium (Ca) :

La présence de calcium dans un sol, dès la surface, provoque une augmentation de la teneur en matière organique totale, ainsi qu'une incorporation de matière organique sur une grande épaisseur. A ces modifications quantitatives s'ajoutent des modifications qualitatives.

Ces modifications se traduisaient surtout au niveau de la proportion d'humine, c'est-à-dire de la matière organique non extractible par les réactifs alcalins.

Il y a ainsi formation d'une forte quantité d'humine résiduelle, résistante à l'action des micro-organismes et protégé physiquement par de fines particules de carbonate de calcium.

En présence de calcaire, il y aura oxydation rapide de la lignine, ce qui ralentirait la fragmentation, ainsi que sa minéralisation par les microorganismes. Cette stabilisation de la matière organique humifiée entraînerait un blocage des protéines [142].

### **3.5.3. Magnésium (Mg) :**

Le magnésium est le huitième élément le plus abondant de l'écorce terrestre qui en contient plus de 2%. Il est léger, sa masse volumique étant équivalente au 25% de celle du fer et 67% de celle de l'aluminium [143].

A cet effet, ont montré que la présence du magnésium à des taux très élevés dans les sols, peut occasionner une dégradation de la structure du sol et une augmentation de l'érosion du sol [144]. Ce processus de dégradation lié aux teneurs élevées en sodium échangeable a lieu en même temps que l'accumulation du magnésium dans le complexe d'échange. [145]

### **1.5.4. Sodium (Na):**

Concernant l'effet néfaste du sodium échangeable sur la structure des sols, le seuil de 15 % est initialement considéré comme le niveau critique qui affecte la stabilité structurale des sols [146] Par la suite, de nombreux travaux ont montré que ce seuil est variable selon certains paramètres caractéristiques des sols tels que la texture, la nature des colloïdes et des constituants secondaires [147] ainsi [148] proposa le seuil de 5 % de sodium échangeable pour définir les sols sodiques.

La salinisation des sols constituent des phénomènes importants dans les zones sèches. Elles provoquent une dégradation des propriétés biologiques, chimiques et physiques des sols. Les conséquences de cette dégradation des propriétés des sols est la diminution de leur fertilité qui entraîne une réduction des rendements des cultures, et parfois la disparition du couvert végétal naturel. Ces phénomènes de dégradation des sols donc des facteurs de désertification [149]

### **1.5.5. Azote (N) :**

L'azote se trouve dans le sol sous trois formes : organique, ammoniacale et nitrique, représentant trois stades de décomposition biologique des matières organiques [150] ; l'essentiel de la nutrition azotée des plantes est assurée par les nitrates. L'azote sous forme d'ions nitrate, est un élément très soluble, peu retenu par le sol [151].

Il provient des sources suivantes :

- \* Atmosphérique, organique, et l'azote des engrais [152].
- \* La carence en azote, inhibe la croissance, entraîne la chlorose des feuilles par diminution de la teneur en chlorophylle en commençant par les plus vieilles [153] et l'apparition de tiges plus minces et plus rigides.
- \* L'excès d'azote va provoquer une stimulation de la croissance des feuilles au dépend des fleurs, tissus tendre à paroi mince, dans les cas graves, chlorose des feuilles jusqu'à entre les nervures, tendant vers sa nécrose et dessèchement, excès de pression osmotique, flétrissement, nécrose racinaires [154].

### 1.5.6. Phosphore (P) :

Dans le sol, le phosphore se présente généralement sous deux états bien distincts : l'un représente la quantité globale donc c'est le phosphore total et l'autre quantité où la plante peut l'utiliser, c'est le phosphore dit assimilable. [155].

Dans le sol il y a uniquement quelques kilogrammes de phosphore présents en solution dans le sol sous forme d'ortho phosphates directement assimilables par les plantes (156FROSSARD et al, [156] estiment qu'un sol est considéré comme riche en phosphore assimilable lorsque sa teneur dépasse 0,3‰, moyennement riche quand cette dernière est comprise entre 0.15 ‰ et 0.3 ‰, et pauvre quand elle est inférieure à 0.15‰.

Le phosphore se trouve dans le sol sous trois formes :

- \* une forme accessible, liée au complexe argilo-humique par le calcium et le magnésium ;
- \* une forme combinée : il est immobilisé, en partie, par les hydroxydes d'aluminium et de fer dans les sols acides (dans ce cas, il est nécessaire de chauler le sol pour le libérer)
- \* une forme insoluble : en sol calcaire, le phosphore peut être sous forme de phosphates de calcium, dont certains sont insolubles [157].

Le phosphore dissous dans la solution du sol et le phosphore adsorbé sur le complexe adsorbant, constituent la réserve rapidement assimilable par la plante [158].

Les normes données par le ministère de la coopération de la république Française (1974) [29]. Pour le phosphore assimilable sont représentées par le tableau suivant :

**Tableau N°21 : Classe d'appréciation pour le phosphore assimilable [29].**

Classe	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> assimilable (‰)
Terres pauvres	0.12
Terres moyennes	0.12 à 0.30
Terres riches	>0.30

Une insuffisance en phosphore provoque un rougissement de la tige et du pétiole des feuilles, angle des nervures très aigu, nanisme général, brunissement des extrémités et des bords des feuilles, suivi de nécrose et une faible croissance des racines.

## 1.6. Métaux lourds dans les sols

### 1.6.1. Généralités

Le terme « métaux lourds » désigne les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes (environ 65 éléments), caractérisés par une forte masse volumique supérieure à 5 g/cm<sup>3</sup> [159].

D'un point de vue biologique, on en distingue deux types en fonction de leurs effets physiologiques et toxiques : métaux essentiels et métaux toxiques.

**a)** - Les métaux essentiels sont à l'état de trace, des éléments indispensables pour de nombreux processus cellulaires, ils se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques. Certains peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil. C'est le cas du cuivre (Cu), du nickel (Ni), du zinc (Zn), du fer (Fe). Par exemple, le zinc (Zn), à la concentration du milli-molaire, est un oligo-élément qui intervient dans de nombreuses réactions enzymatiques (déshydrogénases, protéinase, peptidase) et joue un rôle important dans le métabolisme des protéines, des glucides et des lipides [160]

**b)** - Les métaux toxiques ont un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faible concentration. Ils n'ont aucun effet bénéfique connu pour la cellule, c'est le cas du plomb (Pb), du mercure (Hg), du cadmium (Cd).

Le terme métaux lourds, « *heavy metal* », implique aussi une notion de toxicité. Le terme « éléments traces métalliques » est aussi utilisé pour décrire ces mêmes éléments, car ils se retrouvent souvent en très faible quantité dans l'environnement [161].

L'abondance moyenne globale normalisée de l'élément dans la roche de la croûte est dite « *valeur Clarke* », elle représente pour un métal donné dans le sol ou dans le sédiment ou dans un matériau géologique sa teneur moyenne dans le monde dans ce substrat [162]. La notion de métaux lourds est un concept factuel, industriel, avant tout empirique, sans définition scientifique précise ni technique, selon le sénat français l'appellation métaux lourds est cependant une appellation courante qui n'a ni fondement scientifique ni application juridique [163].

### 1.6.2 .Origine de la contamination des sols par les métaux lourds

Le problème principal avec les métaux lourds comme le plomb, le cadmium, le cuivre et le mercure est qu'ils ne peuvent pas être biodégradés, et donc persistent pendant de longues périodes dans les sols. Leur présence dans les sols peut être naturelle ou anthropogénique.

#### a. Origine géochimique (naturelle) :

Les métaux lourds sont présents naturellement dans les roches, ils sont libérés lors de l'altération de celles-ci pour constituer le fond géochimique [164].

La concentration naturelle de ces métaux lourds dans les sols varie selon la nature de la roche, sa localisation et son âge.

#### b. Origine anthropique

Les principaux types de pollutions anthropiques responsables de l'augmentation des flux de métaux, sont la pollution atmosphérique (rejets urbains et industriels), la pollution liée aux activités agricoles et la pollution industrielle.

La pollution atmosphérique résulte des activités industrielles (rejets d'usine) et urbaines (gaz d'échappement, etc...). Il faut distinguer les apports diffus aériens d'origine lointaine des apports massifs localisés d'origine proche.

Dans les apports diffus sont classés les poussières et aérosols provenant des chauffages ainsi que des moteurs d'automobiles. Les apports massifs localisés résultent d'apports anthropiques accidentels liés aux activités industrielles sans protection efficace contre la dispersion dans l'environnement [165]

Certaines pratiques agricoles sont à l'origine de l'introduction de métaux lourds dans le sol. Les produits destinés à améliorer les propriétés physico-chimiques du sol sont souvent plus riches en métaux lourds que le sol lui-même par exemple les engrais, les composts et les boues de station d'épuration [166]

La pollution industrielle provenant des usines de production de l'activité humaine tels que les matières organiques et graisses (industries agro-alimentaires), les produits chimiques divers (industries chimiques), les matières radioactives (centrales nucléaires, traitement des déchets radioactifs) et la métallurgie [167]. Les déchets miniers et les terrils industriels sont une source particulièrement importante de pollution par le zinc, le plomb et le cadmium.

### 1.6.2.1. Le cadmium :

Dans la solution du sol, seul 10 à 20 % du cadmium sont associés aux composés organiques sous une forme stable. Le cadmium est plus facilement retenu par les hydroxydes de fer et par la matière organique que par les argiles. Dans les sols calcaires, la calcite représente la phase de rétention majoritaire. La mobilité du cadmium est essentiellement fonction du pH : entre pH 4 et 8, l'adsorption de cet ETM sur la phase solide est multipliée par 3 quand le pH augmente d'une unité. Le potentiel redox du milieu est également un facteur important

Le Cadmium est facilement volatile, il peut réagir avec les gaz tels que l'oxygène, le dioxyde de carbone, la vapeur d'eau.

Le cadmium est essentiellement un sous produit qui se forme durant l'exposition minière, la fusion des métaux et le traitement des minerais de zinc, de plomb et du cuivre, 10 % environ du cadmium est obtenu durant le recyclage du fer et de l'acier. [168].

### 1.6.2.2. Le plomb :

La majeure partie de pollution par le plomb provient des activités humaines, l'exposition au plomb par l'eau est généralement faible par rapport à l'exposition par l'air ou par les aliments. Le plomb d'origine naturelle est présent dans l'eau du robinet dans une certaine mesure, mais l'analyse de l'eau de surface et des eaux souterraines laisse penser que la concentration en plomb est plutôt faible [169]

L'argile et surtout la matière organique représentent les phases d'adsorption dominantes du plomb. A pH acide ou neutre, les ions  $Pb^{2+}$  et  $Pb(OH)^+$  prédominent dans la solution du sol ; quand le pH augmente, ces formes sont remplacées par  $Pb(OH)^{2-}$ ,  $Pb(OH)^{3-}$  et  $Pb(OH)_4^{2-}$ . La concentration du plomb dans la solution du sol est extrêmement faible, comprise entre  $10^{-8}$  et  $10^{-9}$  M. Le plomb est l'un des ETM les moins mobiles du sol. Ainsi, entre pH 5 et 9, et à concentration molaire identique, le plomb est 100 fois moins mobile que le cadmium.

Les teneurs en ETM peuvent être très variables au sein d'un même sol, d'un horizon à un autre, tout particulièrement dans le cas de sols à forte différenciation texturale (tels ceux appelés Luvisols, Plano sols, Paléosols différenciés, très fréquents sur le territoire national), et ce en dehors de toute contamination anthropique.

Les teneurs en ETM sont en effet fortement corrélées aux teneurs en argile et en fer, tous les horizons éluviaux (appauvrissement de l'horizon d'un sol en colloïdes (argile, humus, oxydes de fer) par suite de la migration de ces éléments vers des horizons plus profonds ou latéralement.)

Les matériaux et horizons très sableux ou très limoneux sont naturellement les plus pauvres. Mais, en ce qui concerne les échantillons des catégories argileuse ou argileuse lourde (plus de 35 % d'argile), il demeure une très grande incertitude.

Les concentrations en ppm des métaux lourds ayant subi une série de manipulations permettent la mise en solution totale du métal avant le dosage par l'absorption atomique, on constate que la concentration des métaux évolue dans le même sens pour les quatre éléments, pour le plomb ; il est plus élevée par rapport aux autres éléments et pour les échantillons témoins, on remarque une diminution, mais pour la boue on observe que les concentrations sont variables et elles sont plus élevées que celles des sols. Alors les résultats obtenus font apparaître que le sol de notre étude contient des éléments en traces. [170]

Il s'accumule dans les horizons de surface [171] et plus précisément dans les horizons riches en matière organique.

Les résultats concernant la teneur du sol en élément en trace ont révélé que les concentrations de ces métaux des échantillons traités, est élevée par rapport à celles obtenues chez les témoins.

Les teneurs en Pb diminuent, ensuite, plus en profondeur [172]. Ceci s'explique par le fait que le pb est peu mobile. Etant principalement associé aux argiles, aux oxydes, aux hydroxydes de fer et à la matière organique, il n'est mobile que lorsqu'il forme des complexes organiques solubles [173].

#### 1.6.2.3. Le zinc :

C'est un élément chimique de symbole Zn et de numéro atomique 30, avec un état d'oxydation courant égal à 2. En contact avec de l'eau stagnante, il forme des taches blanchâtres constituées notamment d'hydroxyde et d'oxyde de zinc [174].

Le rôle des pratiques industrielles et agricoles dans la contamination des sols doit être pris en compte : cela concerne une grande partie du territoire. Leur accumulation et leur transfert constituent donc un risque pour la santé humaine via la contamination de la chaîne alimentaire, mais aussi pour le milieu naturel dans son ensemble [164].

La forme la plus courante et la plus mobile du zinc dans les sols est  $Zn^{2+}$ , est facilement adsorbée sur les composants minéraux (argiles, hydroxydes de fer et d'aluminium) et organiques, ce qui conduit à une accumulation dans les horizons superficiels. Le zinc est considéré comme facilement soluble par rapport aux autres ETM dans les sols, il est très mobile et disponible dans les sols légers et acides.

#### 1.6.2.4. Le cuivre (Cu):

Le cuivre fait partie des éléments traces métalliques (ETM), catégorie regroupant tous les métaux dont la teneur dans la croûte terrestre est inférieure à 0,01 % en masse. Il peut être trouvé à l'état naturel aux degrés d'oxydation 0, I et II.

La présence de cuivre dans les sols agricoles peut résulter des différents amendements et engrais utilisés. Ainsi, le cuivre peut provenir de boues résiduaires de stations d'épuration (STEP), de composts de déchets urbains, de lisiers et d'engrais phosphatés.

Le Cuivre est l'un des métaux les plus employés à cause de ses propriétés physiques et particulièrement de sa conductibilité électrique et thermique. Il est très largement employé dans la fabrication de matériels électriques (fils, enroulements de moteurs, dynamos, transformateurs), dans la plomberie, dans les équipements industriels, dans l'automobile et en chaudronnerie. Il est présent dans l'environnement, sa concentration dans l'écorce terrestre est estimée à environ 70 ppm (30 à 100 ppm).

Le transport par le vent des poussières de sol, les éruptions volcaniques, les décompositions végétales, les feux de forêts et les aérosols marins constituent les principales sources naturelles d'exposition. Dans les eaux, le cuivre provient pour la majeure partie de l'érosion des sols par les cours d'eau : 68 % ; de la contamination par le Sulfate de Cuivre : 13 % ; et des rejets d'eaux usées qui contiennent encore du Cuivre, même après traitement. Le Cuivre est un élément essentiel chez l'homme et l'animal (oligo-élément), impliqué dans de nombreuses voies métaboliques, notamment pour la formation d'hémoglobine et la maturation des polynucléaires neutrophiles. De plus, il est un co-facteur spécifique de nombreuses enzymes et métalloprotéines de structure. Cependant le Cuivre en excès produit des radicaux libres responsables de lésions cellulaires au niveau de l'ADN et d'organites tels que les mitochondries ou les lysosomes. [175]

#### 1.6.2.5. Le Nickel (Ni) :

D'après Mckenzie, [176], la concentration en Ni des roches sédimentaires serait comprise entre 20 et 40ppm. Elle dépasserait 100 mg/kg dans les roches éruptives mais serait très faible dans les roches granitiques. Ni est présent à forte concentration dans les roches ferromagnésiennes où il se substitue partiellement au fer et au magnésium.

Le Ni est fortement associé aux oxydes de fer et de manganèse, aux carbonates ou inclus comme impuretés au sein de divers réseaux cristallins. Pour la plupart des sols moins de 15 à 30 % de la totalité du Ni est extraite avec les oxydes de Mn. En revanche le Ni anthropogène aurait tendance à rester échangeable, à se lier aux matières organiques et aux carbonates (sols calcaires). [177]

Le sol peut également se trouver enrichi par des apports dus aux activités industrielles, domestiques et agricoles. Dans la littérature il n'est pas fait mention d'apports atmosphériques.

Durant le processus d'altération, le Ni est facilement mobilisable et co-précipité généralement avec les oxydes de fer et de Mn. Cependant à l'inverse des ions  $Mn^{2+}$  et  $Fe^{2+}$ , le  $Ni^{2+}$  est relativement stable dans les solutions aqueuses, et il est capable de migrer sur une grande distance. Généralement, la solubilité de Ni dans le sol est inversement relié au pH.

#### 1.6.2.6. Le chrome Cr :

Le chrome est essentiellement obtenu à partir de la chromite, minerai du type spinelle ; ce dernier est un minerai assez répandu sur le globe. Dans ce minerai le chrome est pratiquement toujours associé au magnésium sous forme de chromite de fer  $FeCr_2O_4$  mais peut être également associé au magnésium sous forme de chromite de magnésium ( $MgCr_2O_4$ ) [178].

La concentration du Cr dans les sols varierait de l'état de traces à 2,4%. D'après Mckenzie, [179] le maximum "normal" dans les sols est de 150ppm; la moyenne est de 100ppm. Les sols peuvent également être enrichis par les rejets (retombées atmosphériques, les boues de stations d'épuration) en provenance des différentes sources traitant le Cr. Les minerais de Cr ont trois grands domaines d'application: l'industrie métallurgique (ferrochromes, silichromes et autres éléments d'addition); l'industrie des pierres réfractaires (fours métallurgiques et de verrerie, briquetage des hauts fourneaux); l'industrie chimique, qui assure en majeure partie la fabrication des diverses combinaisons du chrome, dont la plus importante est le bichromate de sodium. Ces industries constituent les principales sources de pollution par le biais des rejets de leurs effluents, les fumées [179].

#### 1.6.3. Les normes :

Le décret du 8 décembre 1997 et son arrêté du 8 janvier 1998 (Journal Officiel de la République, cf. texte complet présenté dans les annexes), pris en application de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992, viennent clarifier la réglementation française en matière d'épandage des boues issues du traitement des eaux usées urbaines. Ce décret spécifie que les boues doivent avoir fait l'objet d'un traitement de manière à réduire leur pouvoir fermentescible et les risques sanitaires liés à leur utilisation. De plus, le décret précise la valeur agronomique des boues, les teneurs en éléments traces, ainsi que les teneurs limites en micropolluants organiques admissibles. Les teneurs limites en éléments traces métalliques ont été fortement diminuées (divisées par deux) par rapport à l'ancienne réglementation de 1992. Les éléments traces suivis sont le cadmium, le chrome, le cuivre, le mercure, le nickel, le plomb et le zinc.

La méthodologie utilisée pour le dosage des ces micropolluants métalliques est par ailleurs précisée. Les extractions doivent être réalisées à l'eau régale, puis le séchage doit être effectué aux micro-ondes ou à l'étuve. Les éléments sont ensuite dosés par spectrométrie d'absorption atomique, spectrométrie d'émission, ou encore par spectrométrie d'émission couplée à la spectrométrie de masse ou à la spectrométrie de fluorescence. Les teneurs limites en éléments traces métalliques prévus dans la réglementation sont comparées à celles de la directive 86/278 dans le tableau ci-dessous [180] :

Les sols recevant des épandages de boues doivent être caractérisés par :

- Un ph strictement supérieur à 5 (l'épandage sur des sols à ph compris entre 5 et 6 est conditionné au chaulage des boues)
- Des teneurs en éléments traces métalliques inférieures aux concentrations suivantes

**Tableau N°22 :** Teneurs maximales de boues en ETM pour l'épandage dans les sols

	<b>Teneur limite réglementation française (mg/kg de Ms de sol) Arrêté 08/01/98</b>
<b>Cd(Cadmium)</b>	2
<b>Cr(Chrome)</b>	150
<b>Cu(Cuivre)</b>	100
<b>Hg (mercure)</b>	1
<b>Ni (nickel)</b>	50
<b>Pb (plomb)</b>	100
<b>Zn (zinc)</b>	300

### 1.7. Comparaison des teneurs en ETM de certains engrais et produits utilisés en agriculture.

Le tableau n°23 donne, à titre indicatif, les résultats de mesures réalisées sur un certain nombre de produits utilisés en agriculture. Même si les teneurs en ETM peuvent varier selon leur origine, les types de produits et leur fabrication, aucun de ces produits ne peut se prévaloir d'être exempt de traces d'éléments " indésirables ".

Sur le plan pratique, ces informations indiquent en tout cas que l'évaluation des flux d'ETM apportés au sol doit, pour être rigoureuse, tenir en compte toutes les sources possibles d'apports.

**Tableau N° 23 :** Teneur de quelques engrais et produits organiques en ETM (Fourchette de variation en g /T de matière sèche). [168]

	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Hg</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Se</b>	<b>Zn</b>
<b>Boues d'épuration</b>	0.7-8	30-110	170-500	0.7-6	20-60	55-220	0.3-20	500-1400
<b>Engrais azotés</b>	0-10	6-10	5-10	0-1	1-10	0.5-10	0.1-5	2-10
<b>Engrais phosphatés</b>	9-100	90-1500	10-60	0-0.2	5-70	0.5-40	*	50-600
<b>Engrais potassique</b>	0.1-2	0.1-15	0.1-10	0-0.2	0.1-3	5-15	*	1-15
<b>Fumier de bovins</b>	0.3-1.5	5-60	5-40	0.1-0.6	6-40	5-90	*	75-500

Plusieurs remarques à ce tableau :

- a) Les teneurs en ETM varient, au sein d'une même catégorie selon les types de produits, leur origine et leur fabrication.
- b) Comparer les concentrations des différents éléments ne donne pas d'information sur la quantité d'élément effectivement dispersée sur un hectare, les quantités de boues et d'engrais utilisés étant très différentes par exemple si on retient ces deux produits:

On épand généralement 20 à 30 tonnes de boues (MS) par hectare, à comparer aux 500 kg de fertilisants minéraux (N+ P=K) [24].

Une étude ADEME publiée en 2003 et intitulée « Teneur des plantes à vocation alimentaire en éléments traces suite à l'épandage de déchets organiques » a montré que des apports raisonnés des déchets organiques n'augmentent pas significativement à court terme la composition en ETM des céréales (sauf du maïs), du colza et de la vigne dans les conditions expérimentales étudiées. La betterave sucrière et la laitue<sup>53</sup> accumulent par contre les ETM plus fortement (ces résultats étant toute fois issus d'un nombre restreint d'expérimentations) (CNAM - Institut d'Hygiène Industrielle et de l'Environnement Ouest, 2003). [181]

Les métaux lourds sont classés, selon qu'ils sont ou non indispensables au développement des végétaux, et qu'ils posent ou non des problèmes sanitaires . Le manganèse (Mn) et le fer (Fe) sont tous deux indispensables au bon développement des végétaux, et leur utilisation en agriculture ne pose pas de problèmes pour la santé humaine. Ils sont naturellement présents en forte proportion dans le sol.

Les métaux suivants ne sont pas indispensables pour les végétaux, mais ils ne présentent pas de danger pour l'utilisation agricole. Le plomb (Pb) est fixé au sol et par conséquent ne pénètre pas dans les plantes. Le sélénium (Se), l'étain (Sn) et le mercure (Hg) sont présents à de très faibles teneurs dans les eaux épurées pour poser des problèmes sanitaires. Le chrome (Cr), sous forme ionique (Cr<sup>3+</sup>), est peu toxique et n'est pas absorbé par les végétaux. L'Aluminium (Al) est déjà présent naturellement dans les sols en forte proportion.

Les métaux lourds indispensables pour les végétaux, mais dont l'utilisation en agriculture pose des problèmes sont le **cuivre**, le molybdène et le **zinc**. Le cuivre est toxique pour les animaux d'élevage.

Le seuil de phytotoxicité est atteint avant celui de zoo toxicité [182]. Le molybdène n'est pas phytotoxique, mais il pose des problèmes sanitaires pour le bétail. Le zinc est peu toxique, mais s'accumule très facilement dans les tissus végétaux [183].

Les métaux lourds non indispensables au développement des végétaux, et qui sont dangereux d'un point de vue sanitaire sont l'arsenic, **le nickel, et le Cadmium**.

Le nickel est peu toxique, mais il accumule facilement dans les tissus végétaux. Le cadmium est le polluant non organique le plus préoccupant. Il est parfois présent à des concentrations importantes dans les eaux usées et il est très mobile dans le sol. Il s'accumule dans les plantes à de fortes concentrations engendrant la phytotoxicité [184]. Il peut s'accumuler dans l'organisme et provoquer de graves intoxications [185], il est alors recommandé de ne dépasser au plus un apport alimentaire moyen maximum de **0.057 à 0.071 mg/j/individu** [186], on fixe comme un taux maximal dans les aliments de **0.1 mg/kg** pour les légumes et **0.05 mg/kg** pour les céréales et leurs dérivés. [187]

Le risque posé par les métaux lourds dépend, donc, de leur toxicité potentielle et du niveau d'exposition. Par ailleurs, certains métaux sont indispensables pour la croissance des végétaux. Ils s'éliminent facilement par les traitements physiques (décantation) et sont récupérés dans les boues [188].

De ce fait, il semble que la concentration de la majorité des métaux lourds dans les eaux usées épurées domestiques est trop faible pour poser un réel problème sanitaire, quelque soit le risque posé par les effets à long terme des micropolluants organiques est encore très peu étudié ainsi que celui d'apparition de nouvelles substances toxiques [189]. L'existence de tels risques potentiels ne conduit, cependant, pas à une interdiction de l'utilisation d'eaux usées épurées pour l'irrigation [190].

La plupart des éléments traces sont peu solubles, et le traitement des eaux usées par décantation les élimine efficacement. On les retrouve plutôt dans les boues que dans les eaux usées épurées. Les concentrations infimes dans les effluents d'origine urbaine et leur absorption limitée par les végétaux réduisent le risque sanitaire dans le cas d'une réutilisation agricole. Le problème des pesticides et des métaux lourds est plus préoccupant dans le cas du recyclage des boues [191]

## **2. Aperçu socio-économique en agriculture de la valorisation des déchets de STEP et cimenteries:**

### **2.1. Types d'engrais utilisés :**

Les engrais chimiques sont largement utilisés sur les cultures maraîchères notamment. Il s'agit essentiellement de composants N, P, K. Le compost est aussi très utilisé mais en général, les agriculteurs le produisent eux-mêmes car il est lourd et présente des inconvénients au niveau du transport et de son coût.

Le fumier de ferme (Ovins, Bovins et Poulets) est un amendement organique précieux mais leurs prix augmentent fortement en raison de la demande et de la baisse de production (offre). Les déchets ménagers sont rarement utilisés les boues des STEP ne sont que très utilisées en épandage.

Les déchets générés par les stations d'épuration par lits de séchage plantés et latrines écologiques présentent des valeurs élevées en nutriments (N, P, K), en carbone et en matière organique. Ces caractéristiques leur confèrent un potentiel élevé de fertilisation.

## 2.2. Coût des engrais :

Les coûts des engrais est très variable, ainsi pour les engrais organiques tel que le compost fabriqué localement, à partir des rejets des cultures, par l'agriculteur lui-même, les coûts sont très faibles voire nuls ; les engrais chimique sont par contre beaucoup plus élevés, par rapport à la marge nette que pourrait espérer les agriculteurs. Les petits exploitants n'utilisant que de petites quantités, ne bénéficient donc pas de l'avantage des prix de la vente en gros, de surcroits surtaxés par d'éventuel reconditionnement qu'imposerait la vente en détail [192].

Le tableau ci-dessous donne une idée des prix des engrais importés dans différentes localités de l'Annaba.

**Tableau N°24** : Prix de vente au détail dans quelques localités d'ANNABA [193].

<b>Engrais 15.15.15</b>	<b>Boues de STEP</b>	<b>Fumier d'ovin et de Bovin</b>	<b>Fumier de poulet</b>
8000 DA/tonne	200 DA/tonne	5000 DA/tonne	6000 DA/tonne

## Conclusion :

L'utilisation d'autres substrats de culture coûte énormément chère, cependant les boues résiduaires, riches en matière organique et en éléments fertilisants ; azote, potassium et phosphore, peuvent pallier aux fertilisants chimiques ; elles pourraient servir de base pour la préparation d'un substrat de culture moins coûteux et plus disponible. [27].

L'application, dans les conditions édictées par la réglementation de l'épandage des boues en agriculture constitue un intérêt éco environnemental pouvant permettre la réduction substantielle de 38,5 % du cout des engrais de synthèse couteux et polluants dont les dépenses peuvent atteindre les 16 % du coût de production de la culture de pomme de terre. Ils représenteraient 16 % du coût total de production de cette culture.

# **Chapitre V**

**Etude expérimentale des fumures composites**

**conjuguées à l'eau usée et l' potable : Essais**

**sur pomme de terre en sol alluvial sablo**

**,argilo et limoneux**

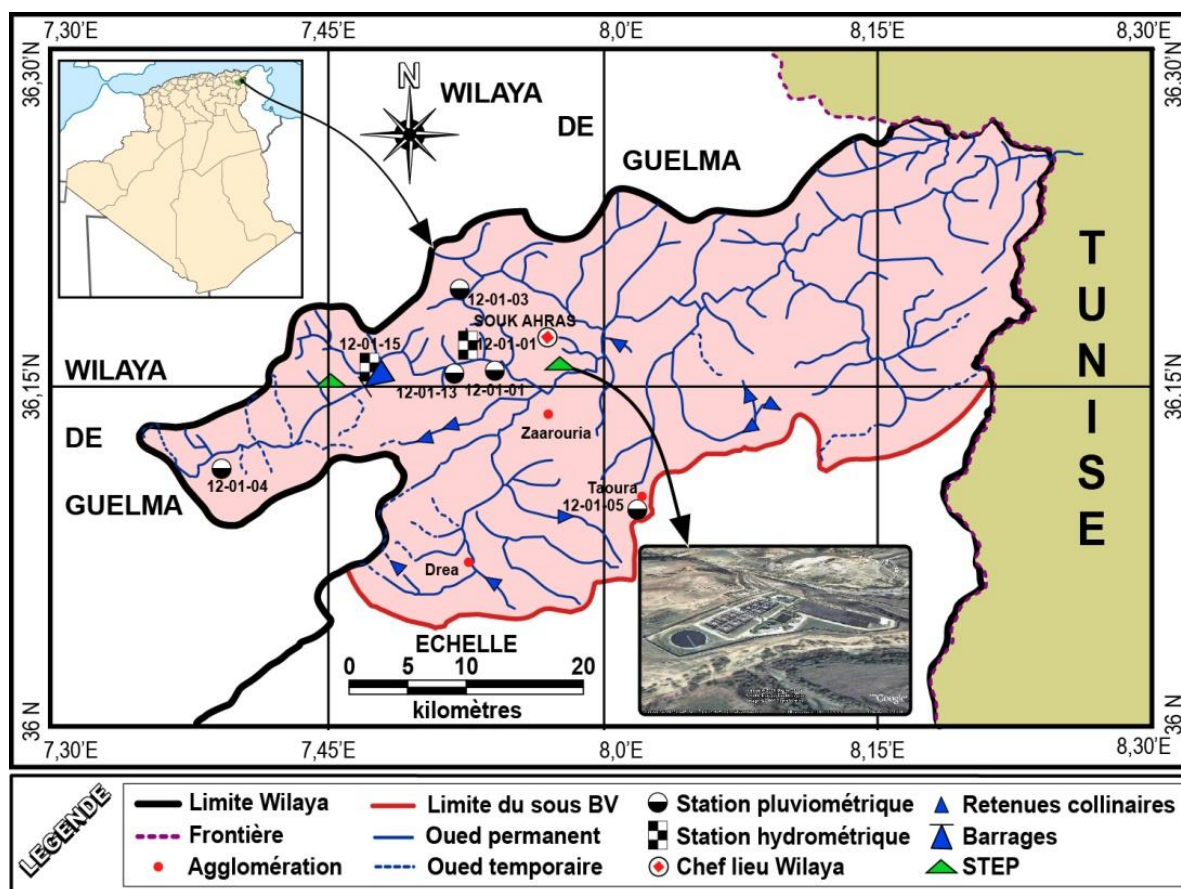
**Introduction :**

Les résultats de la première partie **ont** montré, que le mélange de boue de STEP : boues sèche et de .F.C. a permis de réduire à 9/10<sup>ième</sup> du temps de séchage observé habituellement dans les lits de séchage de la boue de STEP de Souk Ahras .

Dans cette étude nous avons mené quelques expériences à travers lesquelles nous avons déterminé le produit donnant le meilleur rendement agricole (culture des pommes de terre dans notre cas) et qui préserve le mieux l'environnement. Aussi nous avons utilisé quelques engrais tels que fumier d'ovins et de bovins ainsi que l'engrais 15, 15, 15 et la boue d'épuration brute à titre de comparaison. L'irrigation, à l'eau usée épurée et naturelle a aussi été pratiquée pour évaluer les rendements obtenus sous chacun de ce mode d'arrosage.

**1. Localisation et caractéristiques climatiques du site expérimental :**

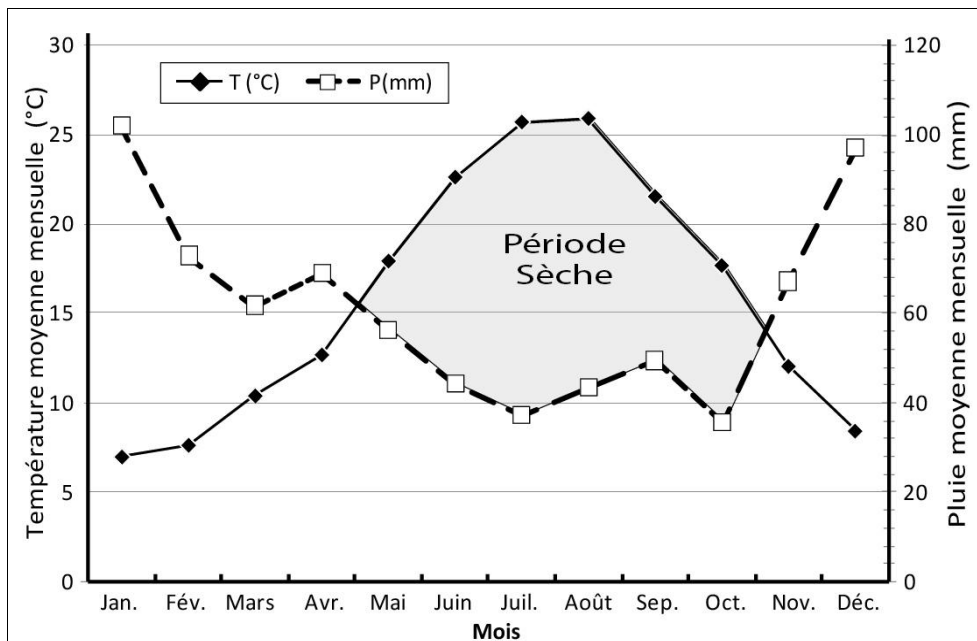
Le site expérimental du sol objet de cette étude est localisé dans l'enceinte de la STEP de la ville de Souk-Ahras se situant aux coordonnées : Longitude : 36°16,081'N, Latitude : 7°59,703', Altitude : 517 m. (cf.Fig.36)



**Figure N°36 :** Localisation géographique et caractéristiques de la zone d'étude [192] [194]

Le climat de la zone est caractérisé par deux saisons l'une sèche et chaude s'étendant de Mai à Octobre et l'autre froide et humide allant du mois de Novembre à Avril [195].

Le diagramme ombrothermique [196] présente les variations moyennes mensuelles des précipitations et températures enregistrées à la station météorologique de Souk-Ahras (Fig. 37), située aux coordonnées : Latitude : 36.17N, Longitude : 75.74E, Altitude : 635m).



**Figure N°37:** Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson de la région de Souk-Ahras (Période de 1986-2004)

## 2. Méthode et principes de réparation des échantillons :

Dans la première partie, l'étude a montré que les meilleurs mélanges de la boues ayant donné le plus court temps de séchage sont ceux relatifs à la FC, BRMFB et la ScBFB, respectivement dans les proportions exprimées en poids (unité en gramme) 100 g, 100 g, et 20 g .

Ces résultats nous suggèrent de poursuivre dans une deuxième expérimentation de ces fumures composites définies comme suit : Boue sèche avec FC, Boue sèche avec BRMFB et la Boue sèche avec ScBFB , la fumure de ferme ovin et bovin) boue sèche engrais de synthèse 15.15.15 Ces fumures ont ainsi été appliquées à la culture de pomme de terre sur sol alluvial sablo argilo limoneux ;l'objectif de cette opération est de pouvoir évaluer le meilleur rendement de la pomme de terre produit par ces actions fertilisantes.

## 3. Méthode de prélèvement d'échantillons de sol :

Le site du sol expérimental est localisé dans l'enceinte de la station d'épuration ou Souk Ahras figure 38.

Il existe deux méthodes de prélèvements : la méthode des diagonales utilisée en arboriculture (verger en place) et la méthode du cercle dite « localisée », employée dans notre cas .

La figure 38, montre une disposition circulaire (méthode circulaire) 15 échantillons d'un kg chacun environ. Ces échantillons ont été alors intimement mélangés, par la suite l'on a prélevé de cet ensemble homogène, un échantillon de synthèse représentatif du sol du site ; cet échantillon a été analysé au laboratoire de FERTIAL.



**Figure N°38** : méthodes du cercle pour prélèvement d'échantillons de sol

### **3.1. Outils de prélèvement :**

L'inventaire en est décrit comme suit : sol du site, la sonde et une tarière pédologique, une pioche, une pelle bêche et un seau pour reconstituer l'échantillon de sol prélevé. Une balance électronique pour les pesées des diverses matières (échantillons de sol, fumures, tubercules de pommes de terre, etc).

Choisir l'outil le plus adapté en fonction de l'humidité et du type de sol. L'outil doit permettre de retirer des carottes régulières sans ségrégation de la matière (perte de particules sableuse par exemple).

La représentativité et la qualité de l'échantillon dépend du respect du nombre et de la régularité des carotte élémentaires prélevées. Si l'emploi de la sonde ou de la tarière s'avère difficile, utiliser une pioche et ou une pelle bêche.

### **3.2. Matériel adapté :**

L'outil de prélèvement doit :

- pénétrer dans le sol, même en conditions sèches ;
- prélever une quantité de terre limitée (environ 50 g par carottage) :
- Afin d'éviter les 'mottes ' difficiles à émietter en terre argileuse humide ;
- Afin de faciliter le mélange dans le seau ;
- Afin d'obliger à faire un minimum de carottages.
- Extraire la terre en quantité suffisante et sans ségrégation (sol sableux sec) ;
- Permettre de maîtriser la profondeur de carottage.

### **3.3. Exécution du prélèvement élémentaire :**

Veiller à commencer un nouvel échantillonnage avec des outils propres. Avant prélèvement, éliminer la végétation qui couvre le sol (seulement les parties vertes sous prairie). Décaper éventuellement la terre sur un demi-centimètre.

### **3.4. Utilisation de la tarière :**

Sur le manche de la tarière, matérialiser les profondeurs de prélèvement par des marques bien visibles, à l'aide par exemple de ruban adhésif coloré (chatterton). Placer la tarière perpendiculairement au sol. Avec un mouvement rotatif dans le sens des aiguilles d'une montre, enfoncer la tarière jusqu'à la limite du cylindre de prélèvement. Retirer la tarière et recueillir le contenu du cylindre dans le seau. Si besoin, retirer une nouvelle carotte pour atteindre la profondeur de prélèvement voulue. Pour les prélèvements de sous-sol réalisé à la tarière, veiller à ne pas laisser retomber de la terre dans le trou de prélèvement en retirant la tarière.

### **3.5. Utilisation de la sonde :**

Placer la sonde perpendiculairement au sol ; enfoncer la sonde jusqu'à la profondeur de prélèvement souhaitée (faire une marque visible sur la sonde) Eventuellement, tourner la sonde d'un tour ou deux (figure 39). Retirer la sonde et recueillir la carotte de prélèvement dans le seau.

En cas de carotte incomplète par suite d'une absence de matière sur une partie de la carotte, recommencer le prélèvement de la carotte.



**Figure N° 39: La sonde de prélèvement d'échantillon**

### **3.6. Utilisation d'une pioche et d'une pelle bêche :**

Avec la pioche ou la pelle, ouvrir un profil vertical du sol sur chaque point de prélèvement et découper une colonnette de terre sur toute la hauteur du profil. Le volume prélevé doit être réparti uniformément sur toute la hauteur du profil.

### **3.7. Constitution de l'échantillon pour laboratoire :**

Tous les prélèvements élémentaires sont rassemblés dans un seau propre pour constituer l'échantillon global.

- Retirer les cailloux, les fragments de végétaux frais, lamacrofaune éventuelle (vers de terre).
- Mélanger soigneusement l'échantillon global.
- L'échantillon pour laboratoire doit faire au minimum 500g.

Si l'échantillon global fait environ 1 kg (capacité maximale du sachet de terre), le transvaser dans son intégralité dans un sac à échantillon de terre. Reporter immédiatement sur le sac le numéro de la feuille de renseignement associée (par écrit ou en utilisant l'étiquette autocollante prévue).

Si l'échantillon fait plus de 1 kg (fréquent si prélèvement à la tarière), il ne peut être contenu dans le sac à échantillon de terre. Diviser alors l'échantillon par la méthode des quartiers pour obtenir l'échantillon pour laboratoire.

Pour ce faire, vider le contenu du d'eau sur une bâche plastique étalée sur une surface plane et dure. Emietter le plus finement possible et homogénéiser. Etaler la matière de manière à constituer une galette circulaire de 15 à 20 cm d'épaisseur.

Selon le volume restant, procéder à une nouvelle division de la terre restante en suivant le même principe jusqu'à obtenir une masse de terre pouvant être contenu dans le sac à échantillon.

Transférer l'échantillon pour laboratoire ainsi obtenu dans le sac à échantillon. Reporter immédiatement sur le sac le numéro de la feuille de renseignement associée (par écrit ou en utilisant l'étiquette autocollante prévue à cet usage).

#### **4. Méthodes :**

Les paramètres physico-chimiques des échantillons de sols ont été effectués au laboratoire de la société FERTIAL, Annaba,.

#### **5. Organisation et description du champ expérimental :**

Une surface de 132.25 m<sup>2</sup> située sur le site de la STEP de la ville de Souk-Ahras (figure.40-41), a été répartie en 16 carrés expérimentaux de 2.5 m<sup>2</sup> chacun, répartis en deux lots séparés par une bande de 0,5 m. Un lot est irrigué à l'eau potable (conventionnelle) l'autre l'est à l'eau usée épurée (figure 42).

Chaque carré est planté, sur deux lignes (billons) espacées d'environ 56 cm, à raison de 3 tubercules/ligne espacés de 35 cm. (soit 6 Tubercules de poids unitaire moyen 500g/carré (Soit une densité 25qx/ha). Une surface de 132.25 m<sup>2</sup> répartie en 16 carrés expérimentaux de 2.5 m<sup>2</sup> chacun.



**Figure N°40** : Localisation du terrain d'essai dans l'enceinte de la STEP  
de la ville de Souk Ahras [194]



**Figure N°41** : Assiette du site expérimental en 16 carrés de 2.5 m<sup>2</sup> chacun

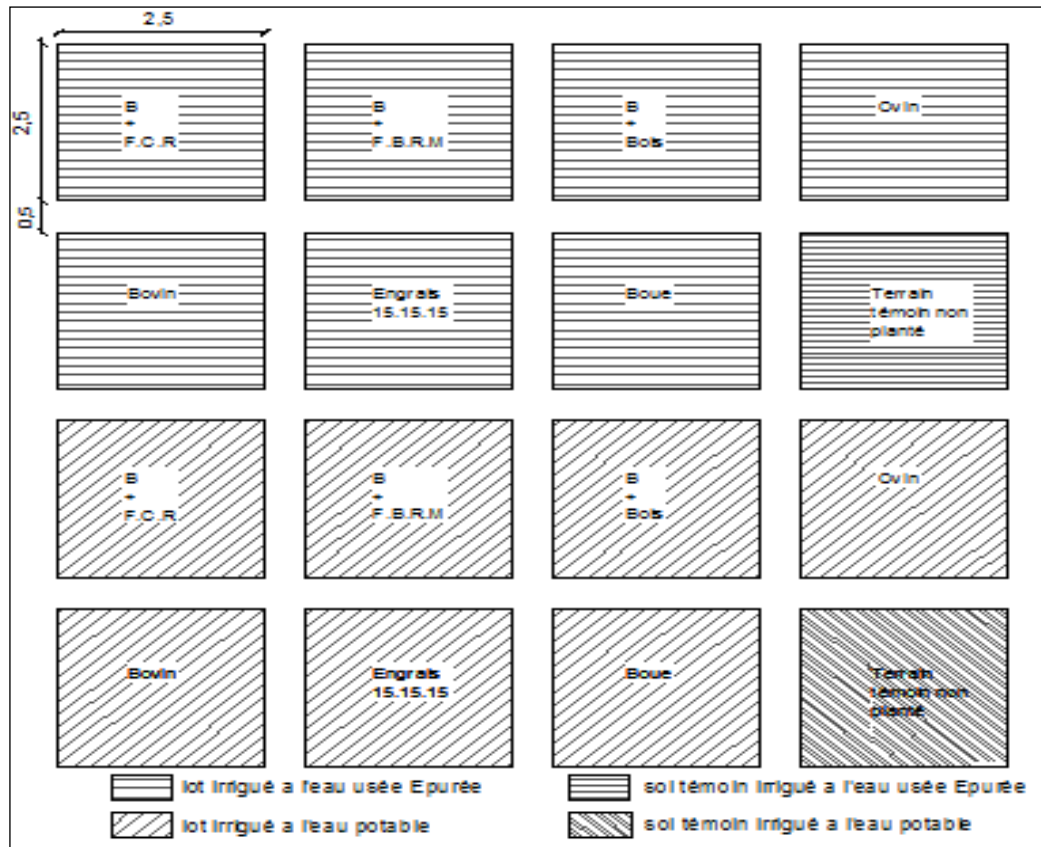


Figure N°42 : Disposition des lots et carrés d'essais expérimentaux



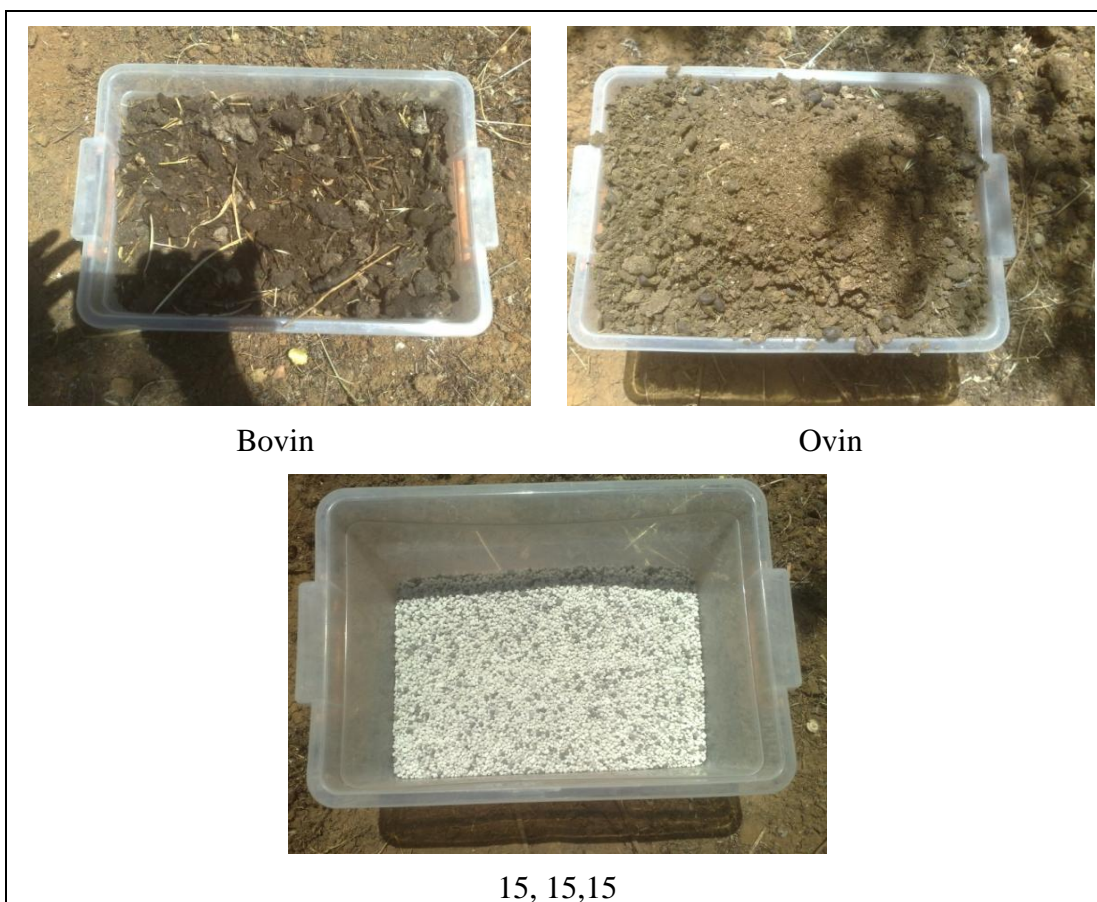
a)- lits de plantation de tubercules

b)- plants de pomme de terre 45 jours après le semis

Figure N°43(a-b) : préparation du sol

La variété de pomme de terre "Samba", originaire de la France et sélectionnée à Souk Ahras (Algérie), a été retenue pour l'expérimentation. Les différentes fumures (tableau12), d'un poids de 300g (figure 44), sont uniformément réparties dans un réduit de fossé de profondeur 15 cm creusé sur chacune des deux lignes des carrés d'essai (figure 43). Les tubercules de pomme de terre y sont alors plantés à 35 cm d'intervalle, puis recouverts par le sol en forme de billon.

Ainsi chaque carré sera constitué de deux billons de largeur 56 cm et deux sillons de 15 cm de large dont l'un en tête du carré et l'autre séparant les billons (Figure 45). Les sillons (ou raies) constituent des réservoirs pour l'eau d'irrigation, distribuée durant le cycle végétatif de la culture, avec une fréquence de trois jours.



**Figure N°44** : Type d'engrais (Ovin, Bovin, 15, 15,15)

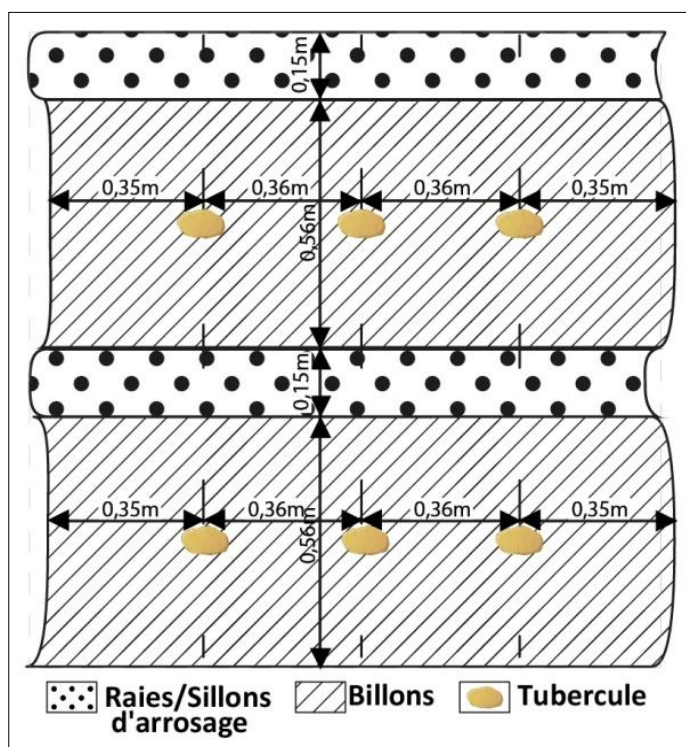


Figure N°45: Schéma de principe d'un carré d'essai

Tableau N°25: Type et origine de la fumure appliquée à chaque carré des deux lots Irrigués à l'eau potable et l'eau usée épurée

Carré 1/9	Carré 2/10	Carré 3/11	Carré 4/12	Carré 5/13	Carré 6/14	Carré 7/15	Carré témoins 8/16
Boues avec rebut de farine de calcaire de cimenterie	boues avec Farine de briques réfractaires magnésiennes	boues avec sciure de bois finement broyée	engrais (Société FERTIAL)	Fumier d'ovin	Fumier de bovin	<b>Boue</b> sèche de la STEP	<b>Sol</b> témoin
<i>FC</i>	<b>FBRM</b>	<b>ScBFB</b>	<b>15.15.15</b>	<b>FO</b>	<b>FB</b>	<b>BS</b>	<b>ST</b>

**6. Caractéristiques physico-chimiques du sol du site expérimental :**

**Tableau N°26 :** Caractéristiques physico-chimiques du sol du site

Paramètres physico-chimiques			Très Faible	Faible	Normal	Elevé	Très Elevé
Conductivité (1/5 mS/cm)	0,186	Non Salé					
pH eau (1/2,5)	7,58	Alcalin					
	%	p.p.m					
Calcaire total	5,5	55.300					
Matière organique	3,1	31.400					
Azote total	0,1	1.400					
	mé./100gr	p.p.m					
Phosphore assimilable (Olsen)	0,05	16					
Potassium échangeable	1,5	570,3					
Magnésium échangeable	1,2	150,7					
Calcium échangeable	32,5	6528,2					
Sodium échangeable	0,2	55,2					

Source : Bulletin édité le 08.11.11 par le laboratoire, FERTIAL-Annaba

Le sol du site nu avant essai est minéralogiquement constitué de : 36% d'argile 48% de sable et 16%de limon, il s'agit d'un sol sablo-argilo-limoneux lourd, non salé, à tendance alcaline, avec un drainage interne déficient et une capacité de rétention très élevée d'eau et d'engrais.

Le pH actuel du sol est légèrement alcalin et peut présenter des problèmes d'assimilations des micros nutriments, notons que le pH optimum pour la culture de pomme de terre se situe environ à 6,5 - 7.

Le taux de matière organique dans le sol est normal, la réserve de calcaire est faible. La teneur du calcium est très élevée, celle du potassium et magnésium est relativement élevée. La matière organique est normale, par contre le sodium, azote et phosphore ont des teneurs faibles à très faibles dans le sol du site qui sera considéré comme témoin dans la suite de l'interprétation des résultats d'analyses obtenus dans les carrés d'essai des deux lots irrigués différemment à l'eau potable et eau usée épurée.

Sur la base de ces résultats le laboratoire de FERTIAL, recommande pour un objectif de 40T/ha de Pomme de Terre en vue d'améliorer les propriétés physiques et chimiques de ce sol par :

- L'apport enfoui (avant culture au moins 1à2mois) d'amendement organique sous forme de fumier de ferme bovins laitiers bien décomposée

→ L'apport d'engrais de fond :

- Apport de 30T/ha de fumier de ferme décomposé de :
  - 30N(s),
  - 170P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,
  - 30MgO(s).
- Engrais de couverture : 70N(s).

**Observation** : Dans le cadre de cette contribution, les essais ont été effectués sans apport de matière organique ni engrais conseillés plus haut, ce qui se répercutera défavorablement sur les rendements attendus.

### **6.1. Conditions expérimentales et hypothèses d'analyse et d'interprétation des résultats des irrigués :**

#### **6.1.1. Conditions expérimentales et hypothèses :**

Le sol, assiette de cette expérimentation est du point de vu structure, considéré comme homogène et isotrope vis-à-vis du comportement hydro dispersif des constituants du sol.

Ces conditions suggèrent de traiter les résultats d'une manière globale (holistique) ; à cet effet l'on prendra les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques des carrés de chacun des deux lots ; ces moyennes seront donc analysées comparativement à la situation de départ soit : les caractéristiques du sol du carré témoin arrosé selon le cas à l'eau usée épurée ou l'eau potable.

#### **7. Interprétation des résultats :**

Les valeurs des paramètres physico chimiques exposés sur la figure **46** (relatives aux sols témoins non cultivés arrosés respectivement à l'eau potable et à l'eau usée épurée), sont sensiblement identiques, ce qui dénote d'une invariabilité de ces éléments.

Les valeurs moyennes sur la figure 47 relatives aux paramètres mesurés des carrés des deux lots, comparées à celles des sols témoins, ne révèlent pas des variations notables ainsi : le sol reste non salin, moyennement basique, les valeurs du potassium et du calcium sont élevées à très élevées ; le magnésium et la matière organique sont moyennes, les autres nutriments sont autant que le sodium faibles.

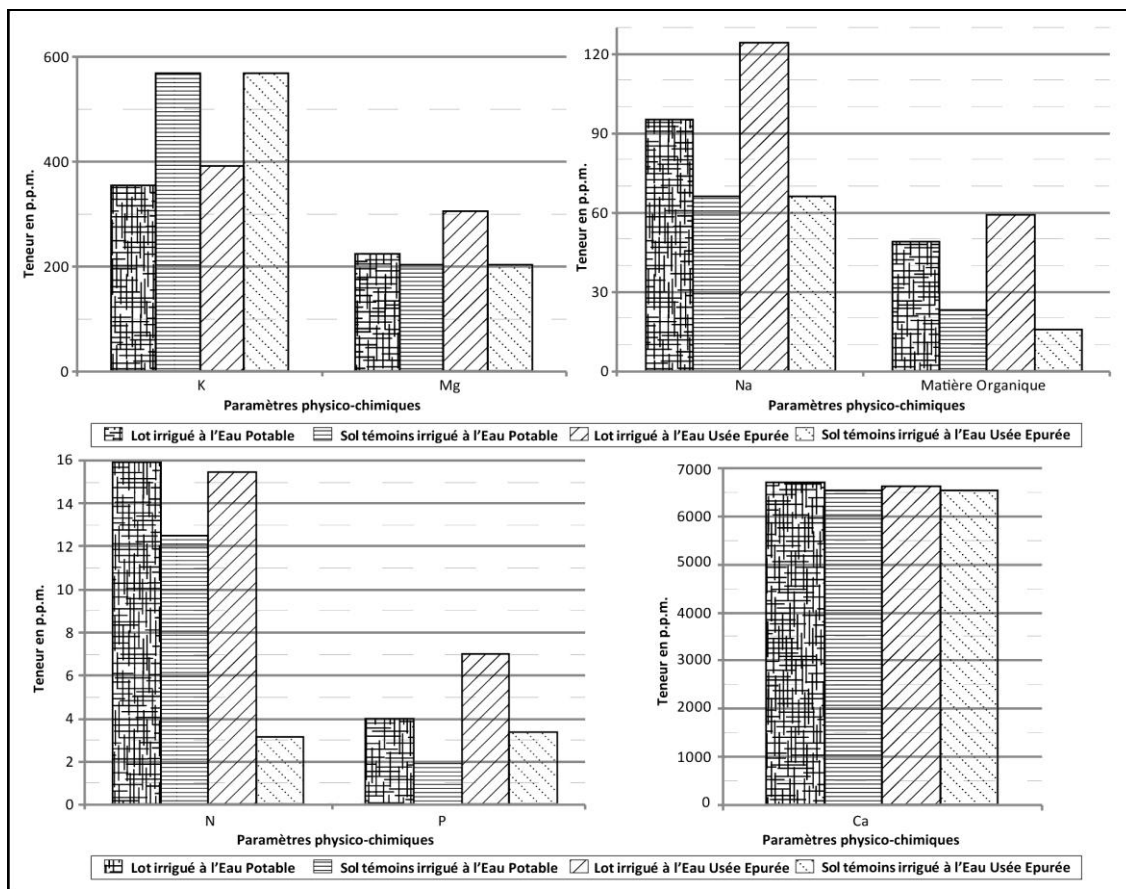


Figure N°46 : Teneurs moyennes des paramètres physico-chimiques des carrés du lot irrigué à l'eau potable et à l'eau usée épuré

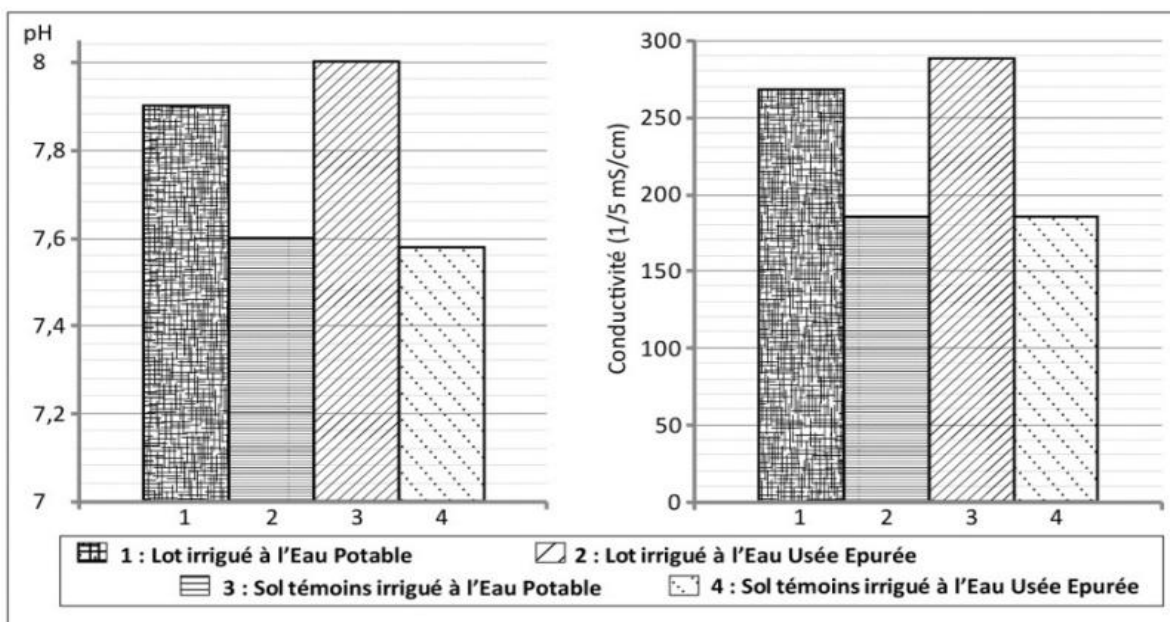


Figure N°47: Potentiel hydrogène (pH) et Conductivité moyennu sol des lots irrigués à l'eau potable et à l'eau usée épurée

Ces résultats suggèrent que la durée de l'essai (cycle végétatif de la Pomme de Terre) 95 jours n'est pas suffisante pour mettre en réaction les relations de l'ensemble "sol-eau-fumure».

On assiste dans cette situation, à une action d'homogénéisation des solutions du sol où le pH élevé a favorisé l'inhibition de certains échanges, notamment ceux gouvernés par le calcium et/ou le potassium, [167] notent que : "*L'abondance de calcium échangeable pose des problèmes agronomiques importants : tout d'abord l'insolubilisation du phosphore par formation de phosphates calciques insolubles, puis l'insolubilisation du bore et enfin la chlorose ferrique des végétaux correspondant à une insolubilisation du fer en milieu basique*".

### **7.1. Analyses et interprétation des rendements**

Date de plantation 13.09.2013, surface unitaire 2.5m<sup>2</sup>/carré expérimental ; nombre de tubercules germés par ligne de semi 3 tubercules; date de récolte le 06.01.2014, tubercules germés par ligne de semi 3 tubercules ;

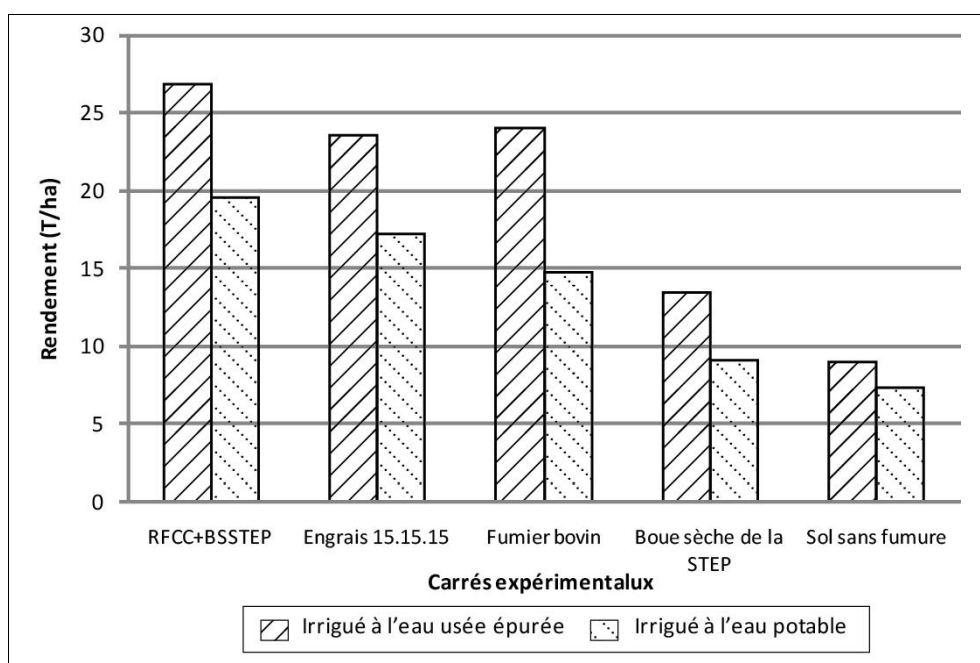


**Figure N° 48** : Plants pomme de terre irriguée à l'EUE



**Figure N°49** Plants pomme de terre irrigué à l'E.P

Les figures 48 et 49 montrent une meilleure vigueur des plants de pomme de terre irriguée à l'eau usée épurée (figure 48) contrairement à la pomme de terre irriguée à l'eau potable (figure 49) ; le constat apparaît sur la longueur des tiges et la densité foliaire.



**Figure N°50** : Rendements de la pomme de terre dans les lots irrigués à l'eau potable et à l'eau usée épurée

Dans les conditions expérimentales sus présentées, le meilleur rendement de 26,8 T/ha, a été enregistré dans le cas de la fumure composite (Boue/F.C.C.) irriguée à l'eau usée épurée.

Ce rendement reste en deçà de l'objectif agro-pédologique prévu de 40T/ha, étant donné l'absence de la fumure de couverture et du traitement phytosanitaire. Mais il faut souligner que ce rendement est toutefois comparable à la moyenne nationale algérienne estimée à 26T/ha [197].

Nonobstant cette observation dépendant du bon itinéraire technique, globalement et, en moyenne ces rendements sont de 19,4 et 6,8 T/ha respectivement pour le lot irrigué à l'eau usée épurée et le lot irrigué à l'eau conventionnelle, ainsi un surplus de 28,5% est enregistré à l'avantage du premier lot ; ce qui s'expliquerait par le potentiel en nutriments des eaux usées épurées.

Ce résultat a été corroboré par les auteurs : OuanoukiB., AbdellaouiN. et Ait Abdallah.N, évoquant dans cette référence "*qu'une lame d'eau épurée de 100 mm (1000 m<sup>3</sup>/ha) apporterait aux cultures selon un mode équivalent à la fertigation : 40 Kg d'Azote minéral et minéralisable/ha, 11 kg de Phosphore assimilable/ha et 28 kg de Potassium/ha*".

#### **8. Valorisation éco environnementale des boues de STEP :**

L'épandage des boues en agriculture pourrait pallier sensiblement aux dépenses liées aux engrais de synthèse polluants et très coûteux.

Cet aspect éco-environnemental a été exposé par le bureau d'étude Suisse BG [198], qui estime, à ce titre qu'à des doses agronomiques normalisées, l'épandage des boues de la STEP de Annaba représenterait, pour la pomme de terre, une valeur économique de 37000 DA/ha, montant estimé sur la base de 10T/an/ha de boue épandable) [198].

En outre l'étude du secteur de la pomme de terre en Algérie [199], a montré, pour un rendement moyen de 26 T/ha (moyenne nationale en Algérie), que les coûts des engrais s'élevaient à 96800 DA/ha.

Ils représenteraient 16 % du cout total de production de cette culture. Ainsi et à titre comparatif, la boue de STEP [198] offrirait pour la pomme de terre, un gain économique substantiel comparé aux engrais de synthèse, de 38,5% (37.000 DA/ha / 96.800 DA/ha)

**9. Etude des ETM dans le sol :**

Avant plantation de la pomme terre, les ETM suivants: Cu, Cr, Cd, Pb, Zn, contenus dans le sol du site et dans les carrés irrigués à l'EUE et à l'eau potable, ont été analysés au laboratoire de chimie de l'université de Badji Moukhtar, mais après récolte de pomme de terre et pour des contraintes techniques survenues au laboratoire, seulement le plomb , le cadmium et le zinc ont fait l'objet d'analyse.

**9.1. Résultats:**

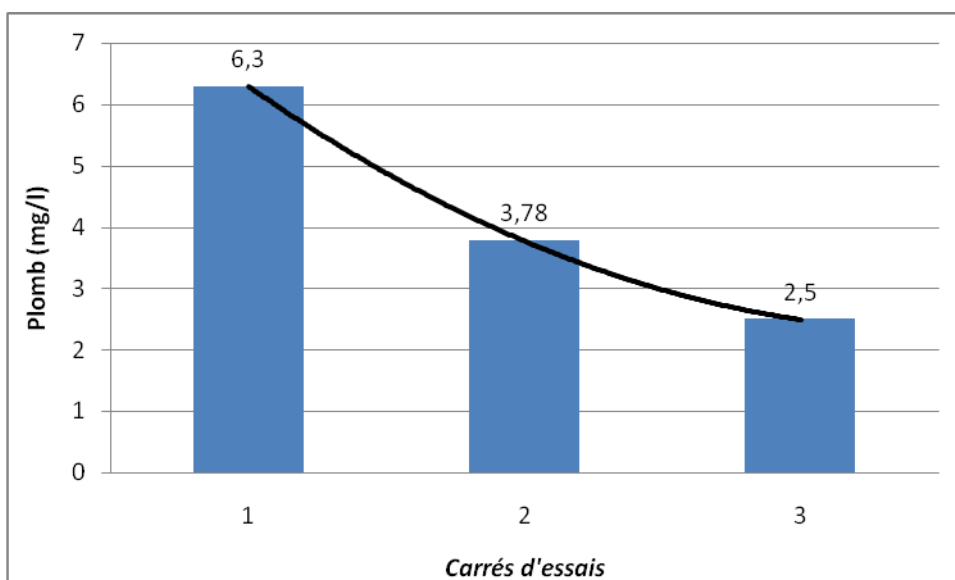
Les résultats sont présentés au tableau suivant :

**Tableau N°27 :** ETM dans le sol du site et moyenne des ETM dans les carrés expérimentaux (sous irrigation à l'EUE et EP)

N° lignes		Plomb (mg/l)	Cadmium (mg/l)	Zn (mg/l)
	<i>Carrés d'essais</i>			
1	ETM dans le Sol du site avant plantation de PdT	6,3	0,349	0,68
2	Moyenne des ETM à l'EUE après récolte de PdT lot irrigué à l'EUE	3,78	0,6	0,28
3	Moyenne des ETM après plantation de PdT lot irrigué à l'EP	2,5	0,35	0,26

**9. 2. Interprétation :** Il en ressort du tableau 27 :

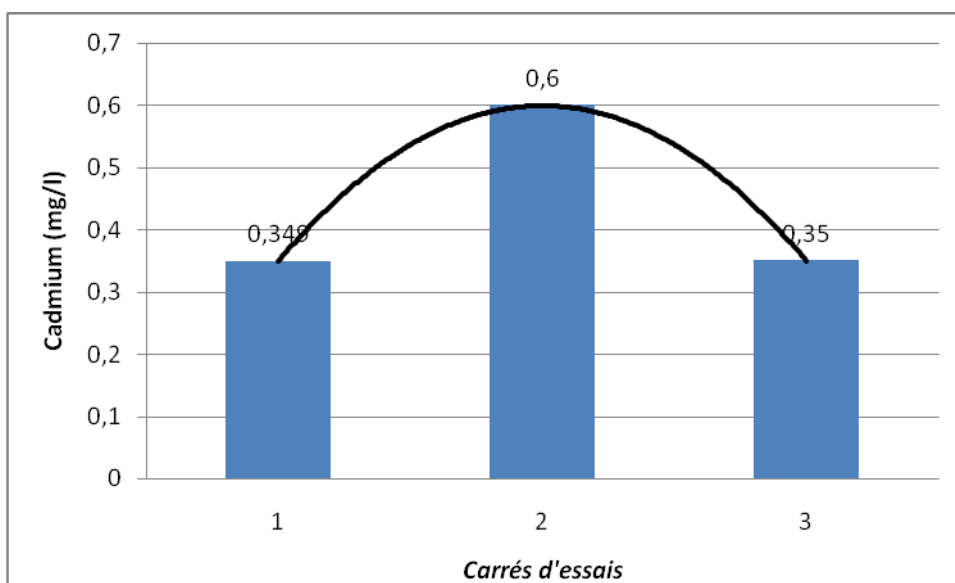
**9.2.1. ETM plomb (figure n°51) :**



**Figure N°51:** Teneurs en plomb dans le sol avant plantation de pomme de terre, 2 et 3 : moyenne des teneuses du plomb après récolte dans les carrés d'essai.

Après récolte de la pomme de terre, la teneur en plomb a sensiblement diminué par rapport celle de l'état initiale dans le sol témoin avant plantation. Ces teneurs sont toutefois en moyenne bien inférieures pour le cas de l'irrigation à l'eau potable comparativement à celles obtenues en irrigation à l'EUE

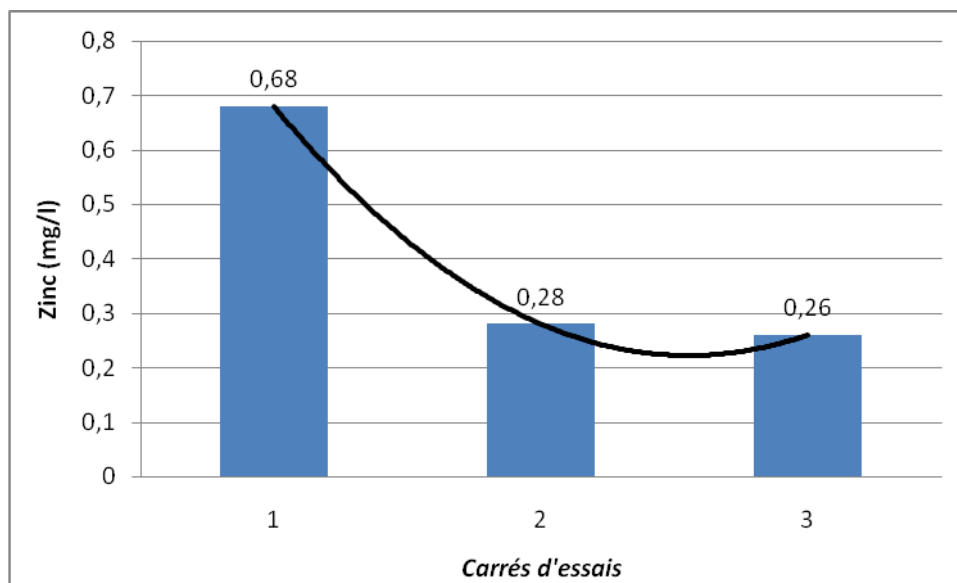
**9.2.2. ETM Cadmium (figure n°52) :**



**Figure N°52:**Teneurs en Cadmium, dans le sol avant plantation de pomme de terre,2 et 3 : moyenne des teneurs en cadmium dans les lots irrigués à l'EUE et EP après récolte, dans les carrés d'essai.

En moyenne, après récolte de la pomme de terre irriguée à l'EUE, la teneur en cadmium, par rapport à celle de l'état initiale dans le sol témoin avant plantation, sensiblement augmenté dans le cas d'irrigation à l'EUE. La teneur du cadmium après récolte de pomme de terre est bien inférieure, pour le cas de l'irrigation à l'eau potable ; elle avoisine cependant celle du sol à l'état initial avant plantation

## 9.2.3. ETM Zinc (figure n°53) :



**Figure N°53:** Teneurs en zinc , dans le sol avant plantation de pomme de terre , 2 et 3 : moyenne des teneuses du zinc , après récolte de pomme de terre dans les carrés d'essai.

Pour les deux type d'eau d'irrigation, la situation de l'après récolte, révèle par rapport aux teneurs du zinc du sol du site avant plantation, une dilution remarquable des teneurs moyennes du zinc dans tous carrés. Toute fois et quel que soit la qualité de l'eau d'irrigation, les teneurs du zinc après récolte sont en moyenne sensiblement égales.

Les métaux lourds sont essentiellement associés à la fraction minérale, ils contiennent par conséquent un faible indice de bio disponibilité [196]. Les teneurs en éléments en trace (ETM) dans le cas expérimental sur pomme de terre, sont, dans toutes les situations (tableau 27) toutes bien inférieures à celles prescrites par les normes internationales.

La dissolution et l'adsorption des ETM dans le sol sont gouvernées outre le pH le potentiel Eh, par des processus très complexes régissant effectivement le complexe argilo humique(CAH) du sol notamment, ainsi diverses phases seraient produites pour porter les différentes formes chimiques des ces ETM (tableau 27).

Dans les sols, les éléments en traces minéraux existent donc sous différentes formes physico-chimiques, du fait d'interactions entre solutés et surfaces réactives minérales, organiques ou biologiques.

Ces interactions influencent la spéciation des éléments en traces minéraux, affectant de fait leur mobilité[201].

Ils peuvent ainsi être rencontrés dans les sols sous formes d'ions libres (hydratés), sous forme de divers complexes avec des ligands organiques ou inorganiques, et sous forme adsorbée ou Co-précipitée [201,202]. Ils sont ainsi associés de façon variée aux différents constituants du sol [203].

**Tableau N°28:** Formes chimiques des différents ETM dans les sols étudiés, distinction entre forme adsorbée et dissoute associées aux principaux composants du sol [204].

Principales phases Porteuses	Forme chimique dans La solution de sol	Forme chimique dans le sol	Elément
Oxydes Fe et Al, Matière organique, Argile		Pb <sup>2+</sup> , PbHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup> , PbOH <sup>+</sup> , PbS, PbSO <sub>4</sub> , Pb(OH) <sub>2</sub> , PbO, Pb(PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	<b>bmolP</b>
CEC, Carbonates	Cd <sup>2+</sup> ou 'acides fulviques	Cd <sup>2+</sup> , CdO <sup>4-</sup> , CdCl <sup>+</sup> , CdHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup> , CdO, dCO <sub>3</sub> , Cd(PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , CdS, CdCl <sub>2</sub>	<b>Cadmium</b>
Matière organique, argiles, oxydes de Fe	Chélates de composés organique solubles ou Zn <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup> , ZnSO <sub>4</sub> , ZnHCO <sub>3</sub> , ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , ZnSiO <sub>4</sub> , Zn <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	<b>cniZ</b>

L'interaction entre solutés et surfaces réactives minérales, organiques ou biologiques influencent la spéciation des éléments en traces minéraux, affectant de fait leur mobilité [202]. différentes formes physico-chimiques peuvent ainsi être rencontrés dans les sols sous formes d'ions libres (hydratés), sous forme de divers complexes avec des ligands organiques ou inorganiques, et sous forme adsorbée ou Co-précipitée [202,203]. Ils sont ainsi associés de façon variée aux différents constituants du sol [204].

**Conclusion :**

Cette contribution montre d'une part, l'avantage de l'impact, sur le développement durable, du recyclage à contexte environnemental, des déchets associés des STEP et de cimenterie et, d'autre, souligne, l'intérêt agro économique de l'usage conjoint de l'eau usée épurée et de la fumure composite (boues sèche, avec .F.C)

Cet usage permettrait d'atteindre le rendement moyen national estimé à 26T/ha de pomme de terre produite en Algérie .Un gain économique substantiel est enregistré correspondant à 38% en équivalent-engrais au prix du marché local .Cette pratique pourrait sensiblement pallier aux dépenses liées aux engrais de synthèse polluant et très couteux représentant 15% du cout total de production.

Dans les conditions de l'expérimentation, les concentrations en métaux lourds sont significativement inférieures aux concentrations admissibles dans le sol où l'épandage des boues peut s'effectuer en conformité avec les normes OMS.

La dissolution et l'adsorption des ETM dans le sol sont gouvernées outre le pH, le potentiel Eh, par des processus très complexes générant les phases porteuses, selon les conditions du milieu, des différentes formes chimiques des ces ETM (tableau 28).

**Conclusion**

**Générale**

### **Conclusion générale :**

Dans cette approche de recherche expérimentale, les résultats obtenus montrent que le meilleur mélange pour chacun des deux déchets FCR et la FBRM, serait de 25% ; il faut relever que dans cette proportion de mélange :

En période chaude les boues étant de siccité 0% et 20%, le plus court temps de séchage moyen obtenu était de 1,5 jour ;

Par contre en période hivernale, pour une boue de cécité 0% et 30%, le plus court temps de séchage enregistré relativement à la FCR et la FBRM était compris globalement ente 4 et 5 jours et 7 à 8 jours pour la ScBFB ;

Comparés à la situation d'état de fait, la réduction temporelle obtenue expérimentalement donnerait des rapports significatifs variant de 1/10 à 1/9 respectivement pour la période d'été et d'hiver.

Globalement ces résultats traduiraient d'une part, l'élimination, en un temps optimal, la pollution générée par les boues de la STEP, sources potentielles de diverses nuisances et, d'autre part le recyclage de 14% de la farine de calcaire rebutée par la cimenterie.

Sur l'ensemble des deux lots d'essais, les résultats montrent que le sol est homogène non salin, moyennement basique, caractérisé par une teneur très élevée en calcium (CaO) et une teneur élevée du potassium.

La matière organique est moyenne, les teneurs des autres éléments tels le sodium, l'azote, le phosphate sont faibles à très faibles. Le rendement maximum de la pomme de terre de 26 T/ha (moyenne nationale en Algérie) a été enregistré dans le carré irrigué à l'eau usée épurée et ayant reçu la fumure composite (B. A. STEP/R.F.C.C.).

L'application, dans les conditions édictées par la réglementation de l'épandage des boues en agriculture constitue un intérêt éco environnemental pouvant permettre la réduction substantielle de 38,5 % du cout des engrais de synthèse couteux et polluants dont les dépenses peuvent atteindre les 16 % du coût de production de la culture de pomme de terre. Ils représenteraient 16 % du coût total de production de cette culture. Ainsi et à titre comparatif, la boue de STEP offrirait pour la pomme de terre, un gain économique substantiel comparé aux engrais de synthèse, de 38,5% (37000 DA/ha / 96800 DA/ha).

Les teneurs des ETM dans le sol sont négligeables ; cependant il y a un constat quant à leur dynamisme avant plantation et après récolte de la pomme de terre .Ce dynamisme s'expliquerait par la dissolution et l'adsorption des ETM dans le sol. Ces réactions sont gouvernées par le pH, le potentiel Eh et par des processus très complexes générant, selon les conditions du milieu, les phases porteuses des différentes formes chimiques de ces ETM (Tableau 28).

# **Bibliographie**

**Bibliographie**

[1] Alkanej Youssef .(2008). Etude de l'effet de l'aération naturelle sur la pollution résiduaire des eaux épurées de la zone de l'Hennetcha W. Souk Haras (N.E.Algérien). mémoire magister, Université Badji Moukhtar Annaba , Pp 1-45.

[2] Rayan Slim .(2007). Etude et conception d'un procédé de séchage combiné de boues de stations d'épuration par énergie solaire et pompe à chaleur. Thèse Doctorat, école des mines de paris, Pp 5.15.

[3] PNE .(2010). Les ressources en eaux non conventionnelles, réalisation de l'étude d'actualisation du plan national de l'eau de l'Algérie, Programme MEDA de l'Union Européenne, UROPEAID/126155/D/SER/DZ, Rapport Aout ,Volume 3, p44.

[4] ONA .(2013). Etat de production des boues des stations d'épuration en Algérie (année 2012 et 1er semestre 2013).

[5] A.I.Stefanakis and V.A.Tsihrintzis. ( 2009) .Surplus activated sludge dewatering in pilot-scale sludge drying reed beds. Journal of Hazardous Materials, volume 172 , pp 1122–1130.

[6] Amadou Haoua . (2007). modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines. Thèse doctorat , Strasbourg I, pp 17-19-24-30- 32-36-93-108.

[7] Heryrakotondramiarana and Jean-Claudegatina .( 2005). Modélisation du séchage solaire : application au séchage en couche mince des boues solides des stations d'épuration. in 12èmes Journées Internationales de Thermique, Tanger, Maroc du 15 au 17 Novembre Pp 203-206.

[8] M. Kouhila , A. Belghit et M. Dagueneu . (1998). Etude Expérimentale du Séchage Convectif de la Menthe dans un Séchoir Modulaire Polyvalent à Chauffage partiellement Solaire . [Energies Renouvelables](#) , volume 4, Pp1-5.

[9] Lowe. P. (1995) . Developments in the thermal drying of sewage sludge. Water and Environment Journal , volume 09, Pp 306-316.

[10] Genere . (1989). l'utilisation des eaux usées en agriculture et en a aquiculture : recommandation à visées sanitaires . Rapport d'un Group scientifique de l' OMS N<sup>o</sup> 778, P7.

[11] Enrica Uggetti, Ivett Ferrer and Joan Garcia.(2010). Sludge treatment wetlands: A review on the state of the art. Bioresource Technology, volume 101, Pp 2905–2912.

[12] Ati Sabrina .( 2010). Etude de l'effet des boues résiduaire sur sol cultivé :

Dynamique du phosphore et son utilisation en zone semi – aride. mémoire de Magister en Agronomie , Université Hadj Lakhdar Batna , Pp 1-5.

- [13] Lahbib Tamrabet.( 2011). Contribution a l'étude de la valorisation des eaux usées en maraichage, Thèse doctorat, Université Hadj Lakhdar –Batna, p11.
- [14] Hind Mouhanni .(2012). Impact de la réutilisation des eaux usées épurées en irrigation. Journal of Water Science, Volume 25, n 1, Pp 69-73.
- [15] H.Bahri et M.Annabi. (2011) Effet des boues urbaines sur la mouillabilité et la stabilité structurale d'un sol cultivé , étude et Gestion des sols, Volume18 , N<sup>0</sup> 1, Pp7-15.
- [17] Nurtaç ÖĞLENİ, SaimÖZDEMİR.( 2010). Pathogen reduction effects of solar drying and soil application in sewage sludge. Turk J Agric For, Volume 34, Pp509-515.
- [18] B. Ouanouki.(2009). Application in Agriculture of Treated Wastewater and Sludge from a Treatment Station . European Journal of Scientific Research , Volume 27 , N<sup>0</sup>4, Pp 602-619.
- [19] Zebarth, B.J. McDougall, R. Neilsen, G. Neilsen, D.(2000). Availability of nitrogen from municipal sewage sludge for dryland forage grass. Can. J. Plant Sci , Volume 80, Pp 575–582.
- [20] Su, D.C.Wong, J.W.C. Jagadeesan, H.(2004). Implications of rhizospheric heavy metals and nutrients for the growth of alfalfa in sludge amended soil. Chemosphere, Volume 56, N<sup>0</sup> 10, Pp 957- 965.
- [21] Soumia Amir, 2005, contribution a la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage : devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost, thèse doctorat , Toulouse,p7.
- [22] Série Technique DT 51.(2012). boues de station d'épuration : techniques de traitement, valorisation et elimination . pp 19- 24-25.
- [23] Station d'épuration souk ahras .(2012). Aspect réglementaires et techniques de l'analyse des eaux usées et des boues d'épuration .Algérie.
- [24] Mujumdar A.S.( 2006). *Handbook of industrial drying*. 3<sup>rd</sup> ed. New York, USA: Taylor and Francis Group, LLC, Pp 688-700.
- [25] Lowe. P.( 1995). Developments in the thermal drying of sewage sludge .Water and Environment Journal , volume, 09, Pp 306-316.
- [26] Enrica Uggetti, Ivett Ferrer and Joan Garcia.(2010 ). Sudge treatment wetlands: A review on the state of the art. Bioresource Technology, vol 101, Pp 2905–2912.

- [27] Karoune Samira .(2008 ). *Effets des boues résiduaires sur le développement des semis du chêne liège (Quercus suber L.)* . Mémoire Magistère , Université Mentouri Constantine, Pp23-29-30-37-69.
- [28] Céline Pernin .(2003). *Épandage de boues d'épuration en milieu sylvo-pastoral : Étude des effets in situ et en mésocosmes sur la méso faune du sol et la décomposition d'une litière de chêne liège (Quercus suber L.)* . These doctorat , AIX-MARSEILLE III, p 9 .
- [29] Mohammad ABU-ORF, Christopher d. Muller and John t. Novak .(2004) . Innovative Technologies to Reduce Water Content of Dewatered Municipal Residuals. *Journal of Residuals Science and Technology*, Volume 1, N° 2 , Pp 83-91.
- [30] Carlos A. Peregrina, Didier Lecomte and Victor Rudolph .(2006). Life cycle assessment (LCA) applied to the design of an innovative drying process for sewage sludge. *Process Safety and Environmental Protection* ,Volume 84, Issue 4, Pp 270–279 .
- [31] S. Glendinning , C. K. Mok and D. V. L. Hunt. (2010). Design Framework for Electro kinetically Enhanced Dewatering of Sludge. *journal of environmental engineering* , volume 136, issue 4, Pp 417-426.
- [32] MA Degang , PEI Yang and LI Zhanyong .( 2011). The Electro-Dewatering of Sludge Using Adsorptive Material . *International Conference on Environmental Engineering and Applications IPCBEE*, volume 17, Pp17-24.
- [33] A.I. Stefanakis and V.A. Tsihrintzis .(2009 ) . Surplus activated sludge dewatering in pilot-scale sludge drying reed beds. *Journal of Hazardous Materials*, volume 172 ,Pp1122–1130.
- [34] Joseph Pronost , Rakha Pronost, Laurent Deplat , Jacques Malrieu, Jean-Marc Berland .(2002) . *Stations d'épuration : dispositions constructives pour améliorer leur fonctionnement et faciliter leur exploitation*. Document technique, ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales, Pp54-60
- [35] Emilie JARDE .(2002). *composition organique de boues résiduaires de stations d'épuration lorraines: caractérisation moléculaire et effets de la biodégradation* , thèse doctorat , l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, Pp 17-18-28.
- [36] Angélique LÉONARD .(2002). *étude du séchage convectif de boues de station d'épuration suivi de la texture par microtomographie à rayons x*. thèse doctorat , Université de liège, p5.

## Bibliographie

---

- [37] Office National de l'assainissement ,2005, manuel d'exploitation réseau et STEP –PROJET, p 19 .
- [38] M.A.Gamrasni .(1981). Utilisation agricole des boues d'origine urbaine. [Centre national de documentation et d'information sur l'eau](#) , ref 84, p 36.
- [39] Stéphane Couturier .( 2002). étude de la déshydratation mécanique assistée thermiquement, thèse doctorat l'université bordeaux i , Pp23.24,26,25
- [40] [A. Liénard](#) , [Ph. Duchène](#) et [D. Gorini](#) .(1995). a study+ of activated sludge dewatering in experimental reed-planted or unplanted sludge drying beds. [Water Science and Technology](#) , [Volume 32, Issue 3](#), Pages 251–261.
- [41] [Martin Hassebrauck](#) et [Gerrit Ermel](#) .(1996). Two examples of thermal drying of sewage sludge. [Water Science and Technology](#) ,[Volume 33, Issue 12](#),+Pp 235–242.
- [42] [Steen Nielsen](#) .(2007). Sludge treatment and drying reed bed systems. [Ecohydrology et Hydrobiology](#) , [Volume 7, Issues 3–4](#), Pp 223–234.
- [43] Enrica Uggetti , Esther Llorens et Joan García.( 2009 ). Sludge dewatering and stabilization in drying reed beds: Characterization of three full-scale systems in Catalonia, Spain. [Bioresource Technology](#) , Volume 100 , Pp3882–3890 .
- [44] S. Troesch , A. Liénard et D. Esser Sludge drying reed beds: a full and pilot-scales study for activated sludge treatment . [Water Science Technology](#), volume 60, pp1145-1154.
- [45] Alexandros I. Stefanakis et Vassilios A. Tsihrintzis.( 2011). Dewatering mechanisms in pilot-scale Sludge Drying Reed Beds: Effect of design and operational parameters . [Chemical Engineering Journal](#) , [Volume 172, Issue 1](#), Pp 430–443.
- [46] Alexandros I. Stefanakis et Tsihrintzis .(2012). Effect of various design and operation parameters on performance of pilot-scale Sludge Drying Reed Beds . [Ecological Engineering](#) volume 38 , Pp 65– 78.
- [47] Eboueme Bountsebe et Luc Thiebaut. (2007). Etude des ossibilités de valorisation des produits issus de traitement des boues de vidange : cas de Yaoundé, Cameroun. [Etude CREPA](#) , Pp 5-108.
- [48] Cemagref. Satese. (1991). Production et gestion des boues dans les stations d'épuration . [Rapport de synthèse](#), p 17.
- [49] OTV. (1997). Traiter et valoriser les boues, collection OTV édition.
- [50] Kengne Noumsi I.M., Amougou Akoa et Koné D. (2007). Potentials of sludge drying beds vegetated with cyperus papyrus L. and Echinochloa Pyramidalis (LAM) hitch&chase for faecal

sludge treatment in tropical regions . African Journal of Microbiology Research , Volume 1, Issue 1-8, p33.

[51] p. Arlabosse .(2001). étude des procédés de séchage des boues urbaines et industrielles. RECORD 99-0217/1A ,rapport final. Québec.

[52] Aida Bayouhdh, Jalila Sghaier et Hatem Mhiri.( 2013). Modélisation de séchage solaire sous serre des boues des stations d'épuration. In 16<sup>èmes</sup> Journées Internationales de Thermique (JITH 2013) Marrakech (Maroc), du 13 au 15 Novembre.

[53] A. Léonard, S. Blacher et M. Crine . (2005). Convective Drying of Waste water Sludges: Influence of Air Temperature, Superficial Velocity, and Humidity on the Kinetics . Drying Technology: An International Journal , [Volume 23](#), [Issue 8](#), pp1667-1679.

[54] [S. S. Waje](#), [B. N. Thorat](#) et [A. S. Mujumdar](#) .(2007). Hydrodynamic Characteristics of a Pilot-Scale Screw Conveyor Dryer. Drying Technology: An International Journal [Volume 25](#), [Issue 4](#), Pp 609-616.

[55] Alexiskuitche, Marceledoun et Cesarkapseu .( 2005). caractérisation du profil de température dans un séchoir électrique a circulation d'air contrôlée, Maîtrise des Procédés en vue d'améliorer la qualité et la sécurité des aliments, Utilisation des OGM, Analyse des risques en agroalimentaire. Ouagadougou ,( 8-11 Novembre ) .Cameroun

[56] Nicolas Roux, Daniel Jung, Cyrille Lemoine . (2010). Modelling of the solar sludge drying process Solia™ Computer Aided Chemical Engineering ,Volume 28, 2010, Pp 715–720.

[57] L. Bennamoun, et A. Leonard .(2011). Etude expérimentale et modélisation du séchage de boues générées par l'épuration des eaux usées. Energies Renouvelables, Volume 14, N°1, Pp1–12.

[58] Piotr Krawczyk , Krzysztof Badyda .(2011). Modeling of thermal and flow processes in a solar waste-water sludge dryer with supplementary heat supply from external sources. Journal of Power Technologies, Volume 91, N°1, pp 37–40.

[59] Lyes Bennamoun, Michel Crine et Angélique Léonard .( 2013).Convective Drying of Wastewater Sludge: Introduction of Shrinkage Effect in Mathematical Modeling . Drying Technology: An International Journal, [Volume 31](#), [Issue 6](#), Pp 643-654.

[60] M. Al-Masri 1 et K. Kahline .( 2013). Développement d'un modèle numérique pour la conception d'un séchage solaire sous serre des produits alimentaires . *Energies Renouvelables* Volume 16, N°2, Pp 297 – 311

## Bibliographie

---

- [61] B. Peeters , R. Dewil et I.Y. Smets .(2010). Modeling of the fouling probability of an activated sludge dryer. *Dynamics and Control of Process Systems, Volume 9 , Part 01* Pp 643-648.
- [62] A. Belghit , M. Kouhila et B. C. Boutaleb .(1999 ). Experimental Study of Drying Kinetics of Sage in a Drying Tunnel Working in Forced Convection . *Energies Renouvelables ,Volume 2, Pp 17-26.*
- [63] A.I. Stefanakis , C.S. Akrotos et V.A. Tsihrintzis .(2003). Surplus activated sludge dewatering in pilot-scale sludge drying reed beds . *Journal of Hazardous Materials, Volume 172, Issues 2–3, Pp 1122–1130.*
- [64] O.Fudym, C.Carrère and B.Ladevie .( 2003). Drying Kinetics and Heat flux in thin- layer conductive drying. *Int.Comm.Heat Mass transfer , vol 30, pp333-347.*
- [65] S. Louarna , J.P. Ploteaua , and H. Noela .( 2014 ). Experimental and Numerical Study of Flat Plate Sludge Drying at Low Temperature by Convection and Direct Conduction”. *Drying Technology: An International Journal, [Volume 32, Issue 14](#), Pp 1664-1674.*
- [66] Dalila Djerroud .( 2010). Modélisation markovienne du séchage continu par contact avec agitation . *Thèse doctorat, Université de Toulouse, Pp 13-14 121.*
- [67] Série Technique DT 51.(2012). Boues de Station d’Epuraton .*Techniques de traitement, Valorisation et Elimination, Pp 24-25.*
- [68] Adrian Rodriguez Garcia .( 2004). étude de la congélation comme technique de traitement des eaux : applications spécifiques . *Thèse doctorat, TOULOUSE ,p 4.*
- [69] Attab Sarah .(2011). Amélioration de la qualité microbiologique des eaux épurées par boues activées de la station d’épurations haoud berkouou par l’utilisation d’un filtre a sable local. *mémoire magister, universite Kasdi Merbah-ouargla , p12*
- [70] Bassompierre Cindy. (2007). procédé à boues activées pour le traitement d’effluents papetiers : de la conception d’un pilote a la validation de modèles. *Thèse Doctorat Institut National Polytechnique De Grenoble, Pp 25-42.*
- [71] Ademe, et Cetiati .(2000). Les procédés de séchage dans l’industrie. *ADEME et CETIAT, eds; ADEME Editions : Angers .*
- [72] Société des ciments de hadjar-soud .( 2013). *procède de fabrication , Pp1-9.*

- [73] S. Senga kiese . (2013) .Valorisation énergétique des déchets de bois traités par voies thermochimiques (pyrolyse et hydroliquéfaction) . Thèse de doctorant, Nantes Angers Le Mans, P32.
- [74] Anware ALEbed .( 2007) . Réactivité thermique et cinétique de dégradation du bois d'arganier application à l'élaboration de charbon actif par activation chimique à l'acide phosphorique. Thèse de doctorant , Université de Mohammed V – Agdal, Rabat, P10.
- [75] ONA. (2013). Etat de production des boues des stations d'épuration en Algérie (année 2012 et 1er semestre 2013).
- [76] M. Messahel, M. N. Chabaca, L. S.Bahbouh, M. S.Benhafid, M. K.Mihoubi, C.Salhi .(2013). Thème 3 (ENSH BLIDA) : Gestion des Boues Résiduaire : Valorisation Agricole Et Impact Sur Les Réseaux D'irrigation (STEP de Tipaza). Rapport Final Projet PNR, ENSH – Blida.
- [77] L.Tamrabet, H. bouzerzour , M. Mekhlouf , M. Kribaa .(2008). RÉPONSE DU BLÉ DUR (*Triticum Durum* Desf.) Variété ACSAD 1107 aux apports de boue résiduaire sous climat semi-aride. recherche agronomique n° 22 - Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie, Pp:23-33.
- [78] A. IDDER, H.CHELOUFI, T. IDDER, S.MAHMA .(2012). Action des boues résiduaire de la station d'épuration des eaux usées de Touggourt (Algérie) sur un sol sableux cultivé. Algerian Journal of Arid Environment, volume 2, n°1, Pp77-81.
- [79] B.Kebdani, L.Missat.(2014). Etude de l'influence de type de la fertilisation et l'apport de fumure sur la culture de pomme de terre (*Solanum Tuberosum* L). Mémoire de Master II, Université Abou Bakr BELKAID - Tlemcen, p 75.
- [80] L.Tamrabet.( 2011). Contribution a l'étude de la valorisation des eaux usées en maraichage. Thèse de Doctorat en sciences, Option : Hydraulique, Université HADJ Lakhdar –Batna.
- [81] R. Khaleel, K. R. Reddy, M. R.Overcash. ( 1981). Changes in Soil Physical Properties Due to Organic Waste Applications: A Review. Journal Environ Qualité, Vol 10, N° 2, Pp133-141.
- [82] B.Dridi, F.Zerrouk .(2000). Apport de boues d'épuration et propriétés d'un sol en Algérie. Cahiers Agricultures, Volume 9, N°1, Pp69-71.
- [83] A.Bahri et B. Houmane.( 1987) . Effet de l'épandage des eaux usées traitées et des boues résiduaire sur les caractéristiques d'un sol sableux de Tunisie. Science du Sol , Volume. 25, N° 4 , Pp 267-278.
- [84] B.Ouanouki, N.Abdellaoui, N.Ait Abdallah .( 2009). Application in Agriculture of Treated Wastewater and Sludge from a Treatment Station . European Journal of Scientific Research, Volume 27, N°4, Pp 602-619.

- [85] B.J. Zebarth , R.Mcdougall , G.Neilsen, D.Neilsen.( 2000). Availability of nitrogen from municipal sewage sludge for dryland forage grass. *Can. Journal Plant Sci.*, Volume 80, Pp:575–582.
- [86] P.R.Warman, W.C. Termeer. (2005) . Evaluation of sewage sludge, septic waste and sewage sludge compost applications to corn and forage: Yields and N, P, and K content of crops and soils. *Bioresour. Technol*, Volume 96, N<sup>o</sup>8, Pp955-61
- [87] C.Sud, J.W.C.Wong , H.Jagadeesan.( 2004). Implications of rhizospheric heavy metals and nutrients for the growth of alfalfa in sludge amended soil. *Chemosphere*,Volume 56, N<sup>o</sup>10, Pp : 957-965.
- [88] S. Amir.( 2005). Contribution a la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage : devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost. Thèse sciences agronomiques, institut national polytechnique de Toulouse, p6.
- [89] A.Bahri et B. Houmane.( 1987). Effet de l'épandage des eaux usées traitées et des boues résiduaires sur les caractéristiques d'un sol sableux de Tunisie. *Science du Sol*, Volume 25, N<sup>o</sup>4 , Pp 267-278.
- [90] Lahbib Tamrabet . (2011). contribution a l'étude de la valorisation des eaux usées en maraichage. Thèse de Doctorat, Université Hadj Lakhdar –Batna , Pp13-80-93.
- [91] Metahri Mohammed Saidi .(2012). élimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées cas de la STEP Est de la ville de Tizi –Ouzou , thèse doctorant , université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, p67-92-110.
- [92] ONA.( 2014). Etat de production des boues des stations d'épuration en Algérie.
- [93] Céline Pernin . (2003). Épandage de boues d'épuration en milieu sylvo-pastoral. Étude des effets in situ et en mésocosmes sur la méso faune du sol et la décomposition d'une litière de chêne liège (*Quercus suber* L). thèse doctorat, docteur de l'université de droit, d'économie et des sciences d'aix-marseille ,p11.
- [94] Ademe. (1999). Situation du recyclage agricole des boues d'épuration urbaines en Europe et dans divers autres pays du monde, Ademe édition, Paris, p 159.
- [95] O.D.Gabarda . (2000). Les boues de station d'épuration d'eaux usées urbaines: les filières alternatives à l'épandage. In *Que faire des boues ? Une approche socio-économique du Club Environnement et Société*. Ecrin , Paris, Pp.58-60.
- [96] N.V. HUE. (1995). Sewage sludge. In *Soil amendments and environmental quality*, Chp 6, CRC Press , Pp 199-247.

- [97] Document . (2015). Boues de STEP, France nature environnement, pp1 - 5 (<https://www.hitpages.com/doc/5941027638607872/1#pageTop>).
- [98] A. Fierro , D.A. Angers , C.J. Beauchamp. (1999). Dynamics of physical organic matter during de-inking sludge de composition. Soil Science Society of America Journal, volume 63, Pp 1013-1018.
- [99] P.H.Krogh , M. Bruus Pedersen . (1997). Ecological effects assessment of industrial sludge for microarthropods and decomposition in a spruce plantation . Ecotoxicology and Environmental Safety, volume 36, Pp 162-168.
- [100] K.Hasselgren . (1999). Utilization of sewage sludge in short rotation energy forestry: A pilot study. Waste Management and Research, volume 17, Pp 251-262.
- [101] L.Jocteur Monrozier . (2001). Conséquences de l'anthropisation des sols. Les boues: quels risques? Colloque Marseille. Mouvement National de Lutte pour l'Environnement éd, P22
- [102] B.J.Lindsay, T.J. Logan. (1998). Field response of soil physical properties to sewage sludge. Journal of Environmental Quality, volume 27, Pp 534-542.
- [103] A.Dudkowski . (2000). L'épandage agricole des boues de stations d'épuration d'eaux usées urbaines. Courrier de l'Environnement de l'INRA, Pp 134-135.
- [104] Q.F.Wei, B.Lowery , A.E. Peterson. (1985) . Effect of sludge application on physical properties of silty clay loam soil. Journal of Environmental Quality, volume 14, Pp178-180.
- [105] S.Stamatiadis, J.W.Doran, , T.KETTLER . (1999). Field and laboratory evaluation of soil quality changes resulting from injection of liquid sewage sludge. Applied Soil Ecology, Volume 12, p 263-272.
- [106] Ademe . (2001). Les boues chaulées des stations d'épuration municipales: production, qualité et valeur agronomique, Ademe édition, Paris, p 224.
- [107] M.J. Mitchell , R. Hartenstein , B.L.Swift , E.F. Neuhauser, B.I.Abrams , R.M. Mulligan , B.A. BROWN, D.CRAIG, D. Kaplan . (1978). Effects of different sewage sludges on some chemical and biological characteristics of soil. Journal of Environmental Quality, volume 7, Pp 5591-5598.
- [108] M.Robert. (1996). Le sol: interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Masson, Paris, p 244.
- [109] Stevenson, Parkinson, M.J. Mitchell . (1984) . Effect of the sewage sludge on decomposition processes in soils . Pedobiologia , volume 26, Pp 95-105.

- [110] S.M. Aggelides , P.A. Londra . (2000). Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and clay soil. *Bioresource Technology*, volume 71, Pp 253-259.
- [111] A.I.AL-Assiuty , M.A.KHALIL, H.M. ABDEL-LATEIF. (2000). Effects of dry sludge application on soil microarthropod communities in a reclaimed desert ecosystem. *Pedobiologia*, volume 44, Pp 567 - 578.
- [112] T.J.Logan , B.J. Lindsay, L.E.Goins , J.A. Ryan. (1997). Field assessment of sludge metal bioavailability to crops: sludge rate response. *Journal of Environmental Quality*, volume 26, Pp 534-550.
- [113] S.M.Aggelides, P.A. Londra . (2000). Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and clay soil. *Bioresource Technology*, volume 71, Pp 253-259.
- [114] M.R. Banerjee , D.L. Burton, S. Depoe .(1997). Impact of sewage sludge application on soil biological characteristics. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, volume 66, Pp 241-249.
- [115] T.Kunito, K.SAEKI , S. Goto, H. Hayashi, H.Oyaizu , S. Matsumoto. (2001). Copper and zinc fractions affecting microorganisms in long-term sludge-amended soils. *Bioresource Technology*, volume 79, Pp 135-146.
- [116] M.Khan , J.Scullion . (2002). Effects of metal (Cd, Cu, Ni, Pb or Zn) enrichment of sewage-sludge on soil micro-organisms and their activities . *Applied Soil Ecology*, volume 20, Pp145-155.
- [117] P. Andrès, E.Mateos, C.Ascaso . (1999). Ecology of Mediterranean evergreen oak forests. In *Ecological studies* , volume 137 (ed. Rodà F., R. J., Gracia CA., Bellot J.)Pp1-20.
- [118] L.J.Bruce , D.I. Maccracken, G.N. Foster, M.N. Aitken . (1997). The effects of cadmium and zinc-rich sewage sludge on epigeic collembola populations. *Pedobiologia*, volume 41, Pp 167-172.
- [119] A.D.Tomlin , R.Protz , R.R.Martin , D.C.Mccabe, R. J. Lagace . (1993) . Relationships amongst organic matter content , heavy metal concentrations, earthworm activity, and soil microfabric on a sewage sludge disposal site. In *Soil structure / soil biota interrelationships*, volume 57 (ed. Kooistra, L. B. a. M. J.), Elsevier, Pp. 89-103.
- [120] H.Koehler . (1999). Predatory mites. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, volume 74, Pp 395-410.

- [121] Werther et Ogada, J.Werther, T.Ogada . (1999). Sewage sludge combustion , Progress in Energy and Combustion Science, volume 25 , Pp55–116.
- [120] A. Dudkowski . (2000) . L'épandage agricole des boues de stations d'épuration d'eaux usées urbaines, Courrier de l'Environnement de l'INRA, Pp 134-135.
- [123] Roula Salaheddine .(2005). caractéristique physico-chimique et valorisation des résiduaux urbains pour la confection de substrats de culture en pépinière hors –sol, mémoire magistère, université colonel El Hadj Lakhdar Batna, Pp37-49.
- [124] document pour Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire .(2009) . Éléments de contexte et réglementation française relatifs a la valorisation des boues issues du traitement des eaux usées, France, Pp 6-8.
- [125] L.Davide . (1956) . Etude géologique sur le mont de Medjerda , la willaya de Souk-Ahras.
- [126] B.Lidia , N. Vysotskaya, N. Tatyana, Leila, V.Timergalina, Leksandr, YU.Dedov, and Stanislqv( 2004) .Effect of partial root excision on transpiration, root hydrolic conductance and leaf growth in wheat seedlings. Plant Physiologie and Biochemistry, volume 1 42, N<sup>0</sup>3 251-255.
- [127] B.Le Clech .( 2000). Agronomie des bases aux nouvelles orientations .Edition Synthèses Agricole, Bordeaux , P260
- [128] Falconn et G.( 1992) . La production des plants forestiers hors -sol. ENGREF (Nancy) P18.
- [129] A.Loue .( 1986) Les oligo-éléments en agriculture, édition .Agr-Nathan, Paris, p 336.
- [130] J.Foucard .(1994) .Filière pépinière de la production et de la plantation .Technique et documentation. Edition Lavoisier, Paris Pp 99-156.
- [131] L.A.Benseghir.( 1996). Amélioration des techniques de production hors-sol du chêne liège : conteneur- substrats- nutrition minérale. Master en sciences forestières CEMAGREF (Aix en provenance) , p 26.
- [132] R.Morel .( 1996). Les sols cultivés 2ème édition Lavoisier, Paris, p 399.
- [133] B. Dridi, C.Toumi .(1999). Influence d'amendement organiques et d'apport de boues sur les propriétés d'un sol cultivé. Institut national Agronomique, El Harrach, Alger. Pp 7-14.
- [134] Bruhier Sylvie Vanpeene , Christian Piedallu , Isabelle Delory.( 2002). Réaménagement forestier des carrières de granulats. Cemagref edition, p 319.
- [135] M.Mustin .( 1987). Le composte, gestion de la matière organique. La valorisation

agronomique des compostes et plus généralement des matières organiques, Edition Française  
dulux, Paris, P 954.

[136] Bollag Jean -Marc1 , Leyval Corinne .( 1998). Interaction entre les minéraux des sols, les composés organiques et les microorganismes. Edit Scientifique, Regist n°404, symposium n°41 Pp1-3.

[137] Sing BR , A .Almas .( 1997). Residual effect of organic matter on cadmium uptake by plant and iys distribution in soil . Paris-France , p 21.

[138] G. Choudhry .(1994). Humic substances :soptive interactions with environmental chemical in :Humic substances structural photophysical and Free radical aspects and interaction with environmental chemicals. Newyork, Gordon and Breache science publisher Inc , Pp95-134.

[139] F. Lemaire , A . Dartigue , L. M .Riviere . (1990) . Les substrats :problèmes particuliers posés par les cultures de plantes ornementales en pots et conteneurs, les relations entre les systèmes racinaires des végétaux et les sols ou substrats artificiels .Compte rendu des séminaires du groupe d'étude des racines, (Aix en provence), Pp 55-71.

[140] M.C. Bélanger.( 2005). Détection de carences nutritives par fluorescence active et spectrometrie. Thèse de doctorat en sciences forestières, université laval, Québec, p 201.

[141] R. Morel .( 1996). Les sols cultivés 2ème édition Lavoisier, Paris, p 399.

[142] F. LE T A C ON. (1978 ). La présence de calcaire dans le sol. Influence sur le comportement de l'Epicéa commun (*Picea exce/sa Link.*) et du Pin noir d'Autriche (*Pinus Nigra nigricans Host.*) , Ann. Sei. Forest, volume 35, N°2 , Pp 165-174.

[143] Noé Verner Murillo Gutierrez .( 2014). Protection contre la corrosion d'alliages de magnésium par des revêtements issus de la voie sol-gel . thèse doctorant , l'Université Paul Sabatier – Toulouse III , P7 .

[144] Dontsova et Norton Dontsova K. and D. L. Norton .(1999). Effects of exchangeable Ca : Mg ratio on soil clay flocculation, infiltration and erosion. Proceeding of 10th International SoilConservation Organization Meeting held May 24 - 29, at Parue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory , Pp 580 – 585.

[145] D.Curtin, H. Steppuhn and F. Selles. (1994) . Effects of magnesium on cation selectivity an structural stability of sodic soils. Soil. Sci.Soc. Am. J, volume 58, Pp 737 - 739

## **Bibliographie**

---

- [146] U.S.Salinity Laboratory Staff .(1954) . Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, U.S.D.A. Handbook n° 60, P160 .
- [147] Shainberg , Lebron , [Shainberg I., J. D. Rhoades, D. L. Suarez, and R. J., Prather . (1981). Effect of mineral weathering on clay dispersion and hydraulic conductivity of sodic soils. Soil Sci. Soc. Am. J, volume 45, Pp 287-291.
- [148] D., S. McIntyre. (1979) . Exchange sodium, subplasticity and hydraulic conductivity of some Australian soils. Australian Journal of soil research , volume 17, p 115.
- [149] G. Aubert . (1975) . Les sols sodiques en Afrique du Nord. Annale de l'Institut National. Agronomique , Algérie, volume I, Pp 185 - 195.
- [150] M.Vilain . (1989) . La production végétale. La maîtrise technique de Production, Tec et Doc, Lavoisier , édition J.B baillière, Volume 2 , p 2335.
- [151] Wikipedia .(2007). Acclimatation au froid. [www.wikipedia.org/wiki/Acclimatation\\_au\\_froid](http://www.wikipedia.org/wiki/Acclimatation_au_froid).
- [152] D.Soltner . (2000). Les bases de la production végétale T1 : Le sol, 22<sup>ème</sup> édition sciences et techniques agricole Maine et loire , France, p 457.
- [153] R Heller , R Esnaut , C.Lance . (1998) . Physiologie végétale 1.Nutrition.5<sup>ème</sup> ed. Masson, Paris,France., p 242.
- [154] A. Skiredj (2005) Besoins des plantes en eau et en éléments nutritifs. Département d'horticulture /IAV Hassan II/Rabat/Maroc, Pp1-12.
- [155] Mihoub Adil .(2012). Dynamique du phosphore dans le système sol-plante en conditions pédoclimatiques sahariennes . Mémoire magister, Université Kasdi Merbah Ouargla , p3.
- [156 ] E. Frossard , P. Julien , A.Neyroud j , S. Sinaj . (2004). Le phosphore dans les sols . Etat de la situation en Suisse. Cahier de l'environnement n° 368, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne , P180.
- [157] C .Schvartz , J.C . Muller, J. Decroux .(2005). Guide de la fertilisation Raisonnée.
- [158] C . Jones , J. Jacobsen .(2001). Plant nutrition and soil fertility Montana university. [www.Colostate.edu](http://www.Colostate.edu).

## Bibliographie

---

- [159] D.Adriano .( 2001) .Trace elements in terrestrial environment: Biogeochemistry, bioavailability and risks of metals, and ed. Springer-Verlag, New-York, NY, USA,Pp1-27.
- [160] A.Kabata-Pendias , H. Pendias . (2001) . Trace elements in soils . 3rd Ed. Boca Raton, London, New York, CRC Press, p 413.
- [161] A.J.M. Baker and P.L. Walker. (1990) . Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants. In: Shaw, J. (Ed.), Heavy Metal Tolerance in plants: Evolutionary aspects. CRC Press, Boca Raton, Florida , Pp155-178.
- [162] Mariana Yossifova , SevdalinaValceva , and Evelina Djourova .(2007). Mineralogy and Environmental Geochemistry of Lagooned Ashes Resulted Combustion of Maritza East Lignite. Bulgaria, International Journal of Coal Geology, Volume 71, Issues 2-3, Pp 287-302.
- [163] Sénat Français : rapport d'information .(2001). les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé» N°261 .
- [164] P.H. Bourrelier , and J. Berthelin . (1998). Contamination des sols par les éléments traces: les risques et leur gestion. CR. AccSci, 42. Ed. Lavoisier, Paris.
- [165] Ouafae Bouchouata , Moussa Bounakhla et Benaïssa Attarassi .(2011). Etude de la contamination par les métaux lourds des eaux d'irrigation et les cultures maraîchères dans la zone M'nasra (Gharb,Maroc). Science Lib Editions Mersenne ,Volume 3 , N °111006, Pp1-12
- [166] D. Baize .(1997). Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). INRA Editions, Paris, p 408.
- [167] Mme SLATNI Ibtissem .(2014) . Etude de la destruction ou la perturbation des espèces végétales par la pollution. Mémoire magister , Université De Med Cherif Messaadia, p7.
- [168] Ademe . ( 2001 b). Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture. Ademe édition, Paris, p59.
- [169] CALVET.( 2003) . Le Sol propriétés et fonction: Tom I et II. Ed Dunod.
- [170] Thomas Durand, Twelve lessons from, Key Technologies .(2005). The French technology foresight exercise. Journal of Forecasting , [Volume 22, Issue 2-3](#), 2003pp 161–
- [171] T. Sterckeman, N . proix.( 1999). Estimation des quantités de Cd , Cu , Pb et Zn phyto-disponibles à l'aide d'extractions chimiques. aipagrese-Programme QUASAR Deuxième rapport intermédiaire, p5.
- [172] [Michel Morlot](#). (1996). Aspects analytiques du plomb dans l'environnement. Technique & Documentation, p483.

- [173] I. Raski, B.D. Ensley. (2000). phytoremediation of toxic metals : using plant to clean up the environment , Wiley, New York .
- [174] Bonneau et Souchier .(1994). Pédologie 2 : constituants et propriétés du sol. Ed. Masson.
- [175] A. Pichard .(2003). Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, cuivre et ses dérivés .P66.
- [176] R.M. McKenzie. (1980). The adsorption of Lead and other heavy metals on oxides of Manganese and Iron. Aust, J. Soil. Res. Volume 18 Pp61-73.
- [177] D. Baize .(1997). Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. Références et stratégies d'interprétation , Editions INRA Paris , France, p408.
- [178] Belabed Bourhane – Eddine .(2010). La pollution par les métaux lourds dans la région d'Annaba Sources de contamination des écosystèmes aquatiques. Thèse doctorant, université Badji Mokhtar – Annaba , p15.
- [179] Kebir Tahar.(2012) .étude de contamination, d'accumulation et de mobilité de quelques métaux lourds dans des légumes, des fruits et des sols agricoles situés près d'une décharge industrielle de l'usine al zinc de la ville de hazaouet, thèse doctorant , université abou bekr belkaid –Tlemcen, , P29.
- [180] document pour Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire .(2009). éléments de contexte et réglementation française relatifs à la valorisation des boues issues du traitement des eaux usées ,France, Pp 6-8.
- [181] Final report Emmanuelle Ughettoineris.( 2012). Panorama des projets de recherche et perspectives sur la problématique des micropolluants dans les boues de stations de traitement des eaux usées urbaines , Pp39-40.
- [182] S. Baumont, J.P. Camard, A. Lefranc, et A. Franconi .(2004). Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France. Observatoire Régional de Santé d'Île-de-France, Documentaire, p 176.
- [183] F.C. Boswell, M.B. Parker and T.P. Gaines . (1989). Soil zinc and pH effects on zinc concentrations of corn plants. Communications in soil science and plant analysis, volume 20, Issue 15-16, Pp 1575-1600.

## Bibliographie

---

- [184] N. Gupta, , D.K. Khan and S.C. Snatra .(2007) . An assessment of heavy metal contamination in vegetables grown in wastewater irrigated areas of Titagarh, West Bengal, India. Bull. Environ. Contam. Toxicol, Volume 80 Pp115-118.
- [185] Y.Yang , F.S. Zhang , H.F. Li and R.F. Jiang . (2008). Accumulation of cadmium in the edible parts of six vegetable species grown in Cd-contaminated soils. J. Environ. Management ,volume 90 ,Pp1117–1122.
- [186] OMS. (1997). Aspects sanitaires et nutritionnels des oligo-éléments et des éléments en traces. Editions de l’OMS, 366 p.
- [187] FAO. (2000). Water quality management and pollution control in the Near East : An overview. Regional workshop on water quality management and pollution control in the Near East . Cairo (Egypt).
- [188] Ademe . (2000). Les boues d’épuration municipales et leur utilisation en agriculture. Dossier Doc, p 59.
- [189] B.Garban , D. Ollivon, M.J.Teil , M. Blanchard, H. Blanchoud, , A. Motelay-Massei, C. Chesterikoff, L. Hanselin, J. Rolet, J. Le Genti, Et M. Chevreuil . (2003). Activités humaines et transferts de polluants organiques persistants (POP). Laboratoire Hydrologie et Environnement, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 36 p.
- [190] N.G. Jiries, F.M. Al Nasir , and F. Beese . (2002). Pesticide and heavy metals residue in wastewater, soil and plants in wastewater disposal site near Al-Lajoun Valley, Karak, Jordan. Water, Air and Pollution, volume 133, Pp97-107.
- [191] Cauchi, Hyvrard, Nakache, Schwartzbrod, Zagury, Baron, Carre, Courtois, Denis, Dernas, Seguret .(1996). La réutilisation des eaux usées après épuration. Techniques. Sciences et méthodes, volume 2 , Pp81-118.
- [192] Terres Fertiles (juillet 2006) : magazine du PRSSE, n°004, juillet 2006
- [192] ABH .( 2001). Les cahiers de l’agence, le bassin versant Medjerda-Mellegue, pp 2-12
- [193] BEN LAMOUDI Z., 2010, Diagnostic sur la situation de la culture de la pomme de terre dans la région de Oued Souf, Mémoire d’Ingénieur en Sciences Agronomiques, Université Kasdi MERBAH Ouargla, pp : 36-38
- [194] Google Earth Pro, version 7.1.2.2041, image satellitaire du 22.8.2015 .

## Bibliographie

---

- [195] Guerfi Zouleikha .( 2012). Impact de l'utilisation des boues résiduaires sur les propriétés physico--chimique des sols de la haute Vallée de la Medjerda wilaya de Souk Ahras . Mémoire Magistère, Université Badji-Mokhtar Annaba, p82.
- [196] L. Emberger .( 1955) . Une classification biogéographique des climats. Nature. Monspl. Série Bot.
- [197] M. BONNEAU, B. SOUCHIER . 1979. Pédologie - Constituants et propriétés du sol, édition MASSON, p 377.
- [198] Ingénieurs Conseils SA.( 2011). Étude de réutilisation des eaux usées épurées et des boues stabilisées de la STEP d'Annaba, Lausanne.
- [199] Agricole : intitulée : Améliorer la culture, la manutention post-récolte et les pratiques de commercialisation de la pomme de terre en Algérie du point de vue néerlandais
- [200] Mounia Chaguer . (2013). Analyse et Spéciation des Métaux dans un Oued en zone Minière Cas de l'Oued Essouk . Thèse doctorant ,Universite Constantine I , p4.
- [201] A. C. M. Bourg. (1988) . Metal in aquatic and terrestrial systems : sorption, speciation, and mobilisation. In: W. Springer Verlag. p 3-30.
- [202] D. Baize. (1997) . Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols(France). Paris, INRA Pub p 408.
- [203] L. J. Evans. (1989) . Chemistry of metal retention by soils, Journal. Environmental Science and Technology. Volume 23, N<sup>o</sup>9 ,Pp 46-56.
- [204] Ben Seghier Taiba .(2012) . Evaluation de la contamination métallique dans des sols agricoles situés à Maghnia (Hammam Boughrara). mémoire magister , Université de Tlemcen,p20.

# **ANNEXE**

## **1. Résultant des analyses de sol :**

Tableau 5 Résultats des analyses des échantillons prélevés sur le terrain qui a été divisé en 16 morceaux  
comme ils le feraient de 1 à 8 ont été irrigués avec des eaux usées et du 9 au 16 de l'eau potable

<i>de Client</i>	<i>K meq/100g</i>	<i>Na meq/100g</i>	<i>Mg meq/100g</i>	<i>Ca meq/100g</i>	<i>P ppm *</i>	<i>N %</i>	<i>pH *</i>	<i>M.O %</i>	<i>Cond ms/m *</i>	<i>Sable%</i>	<i>Argile%</i>	<i>Limon%</i>
<i>1=f+b</i>	<i>1,34</i>	<i>0,29</i>	<i>4,48</i>	<i>33,1</i>	<i>7,4</i>	<i>0,389</i>	<i>8,06</i>	<i>0,93</i>	<i>41,9</i>	<i>44</i>	<i>8</i>	<i>48</i>
<i>2=d+b</i>	<i>0,68</i>	<i>0,43</i>	<i>1,97</i>	<i>33,2</i>	<i>6</i>	<i>0,292</i>	<i>8,02</i>	<i>0,94</i>	<i>22,5</i>	<i>44</i>	<i>12</i>	<i>44</i>
<i>3=bois</i>	<i>0,62</i>	<i>0,53</i>	<i>1,84</i>	<i>38,95</i>	<i>28,4</i>	<i>0,329</i>	<i>7,86</i>	<i>1,42</i>	<i>96,2</i>	<i>52</i>	<i>8</i>	<i>40</i>
<i>4=15.15</i>	<i>0,86</i>	<i>0,47</i>	<i>1,62</i>	<i>33,46</i>	<i>39,6</i>	<i>0,404</i>	<i>7,94</i>	<i>1,8</i>	<i>36,1</i>	<i>60</i>	<i>8</i>	<i>32</i>
<i>5=Ovine</i>	<i>0,76</i>	<i>0,55</i>	<i>1,71</i>	<i>32,23</i>	<i>35</i>	<i>0,418</i>	<i>8,06</i>	<i>3,42</i>	<i>26</i>	<i>44</i>	<i>12</i>	<i>44</i>
<i>6=Bovine</i>	<i>0,85</i>	<i>0,65</i>	<i>1,61</i>	<i>33,1</i>	<i>59,2</i>	<i>0,553</i>	<i>7,98</i>	<i>2,09</i>	<i>30,5</i>	<i>40</i>	<i>12</i>	<i>48</i>
<i>7=bous</i>	<i>1,07</i>	<i>0,39</i>	<i>2,06</i>	<i>31,94</i>	<i>9,2</i>	<i>0,663</i>	<i>8,07</i>	<i>1,32</i>	<i>20</i>	<i>32</i>	<i>12</i>	<i>56</i>
<i>8=netre</i>	<i>0,56</i>	<i>0,62</i>	<i>1,7</i>	<i>34,66</i>	<i>6</i>	<i>0,218</i>	<i>8,09</i>	<i>0,97</i>	<i>27,2</i>	<i>40</i>	<i>12</i>	<i>48</i>
<i>9=f+b</i>	<i>0,62</i>	<i>0,51</i>	<i>1,74</i>	<i>32,61</i>	<i>26,2</i>	<i>0,316</i>	<i>7,97</i>	<i>1,63</i>	<i>30,4</i>	<i>48</i>	<i>4</i>	<i>48</i>
<i>10=d+b</i>	<i>0,57</i>	<i>0,23</i>	<i>1,74</i>	<i>43,46</i>	<i>28,4</i>	<i>0,131</i>	<i>8,08</i>	<i>1,47</i>	<i>18,32</i>	<i>56</i>	<i>8</i>	<i>36</i>
<i>11=bois</i>	<i>0,81</i>	<i>0,36</i>	<i>1,86</i>	<i>35,58</i>	<i>94,8</i>	<i>0,292</i>	<i>7,99</i>	<i>2,71</i>	<i>21,5</i>	<i>48</i>	<i>12</i>	<i>40</i>
<i>12=15.15</i>	<i>0,75</i>	<i>0,25</i>	<i>1,69</i>	<i>36,1</i>	<i>38,2</i>	<i>0,188</i>	<i>7,94</i>	<i>1,15</i>	<i>28,5</i>	<i>40</i>	<i>12</i>	<i>48</i>
<i>13=ouvon</i>	<i>0,65</i>	<i>0,2</i>	<i>1,52</i>	<i>35,58</i>	<i>13,4</i>	<i>0,13</i>	<i>7,93</i>	<i>1,47</i>	<i>23,4</i>	<i>48</i>	<i>12</i>	<i>40</i>
<i>14=bouvon</i>	<i>1,51</i>	<i>0,25</i>	<i>1,84</i>	<i>31,44</i>	<i>55,4</i>	<i>0,378</i>	<i>8,03</i>	<i>1,63</i>	<i>21,8</i>	<i>52</i>	<i>8</i>	<i>40</i>
<i>15=bous</i>	<i>0,86</i>	<i>0,37</i>	<i>1,87</i>	<i>33,54</i>	<i>76,2</i>	<i>0,267</i>	<i>7,8</i>	<i>1,87</i>	<i>26,7</i>	<i>56</i>	<i>4</i>	<i>40</i>
<i>16=netre</i>	<i>0,68</i>	<i>0,31</i>	<i>1,82</i>	<i>32,64</i>	<i>23</i>	<i>0,252</i>	<i>7,93</i>	<i>1,23</i>	<i>21,4</i>	<i>48</i>	<i>12</i>	<i>40</i>

Tableau N<sup>0</sup> 2: les analyses chimique des métaux lourds avant plantation de pomme de terre

	Plomb (mg/l)	Cadmium (mg/l)	Cuivre(mg/l)	Zinc(mg/l)	Chrome (mg/l)
FC	5,8	0,511	2,82	0,43	0,09
FRMB	4,9	0,263	2,25	0,21	0,08
Terre	6,3	0,349	3,56	0,68	0,06
Boues	1,27	1,93	97,9	65,83	12,98

**Tableau N° 3:** les analyses chimique des métaux lourds après les plantations de pomme de terre irriguer par (eau usée)

<i>de Client</i>	zinc (Mg/l)	fer (Mg/l)	Plomb (Mg/l)	Cadmium (Mg/l)
<i>1=f+b</i>	<b>0,53</b>	<b>0,74</b>	<b>4,2</b>	<b>0,69</b>
<i>2=d+b</i>	<b>0</b>	<b>0,5</b>	<b>3,8</b>	<b>0,53</b>
<i>3=bois</i>	<b>0,35</b>	<b>0</b>	<b>1,8</b>	<b>0,03</b>
<i>4=15.15</i>	<b>0,24</b>	<b>0,1</b>	<b>3,6</b>	<b>0,45</b>
<i>5=Ovine</i>	<b>0,52</b>	<b>0</b>	<b>4,7</b>	<b>0,92</b>
<i>6=Bovine</i>	<b>0</b>	<b>2,06</b>	<b>3,9</b>	<b>0,74</b>
<i>7=bous</i>	<b>0,3</b>	<b>0,9</b>	<b>4,4</b>	<b>0,81</b>
<i>8=netre</i>	<b>0,89</b>	<b>0</b>	<b>5,7</b>	<b>0,95</b>

**Tableau N° 4:** les analyses chimique des métaux lourds après les plantations de pomme de terre irriguer par (eau potable)

<i>de Client</i>	zinc (Mg/l)	fer (Mg/l)	Plomb (Mg/l)	Cadmium (Mg/l)
<i>9=f+b</i>	<b>0,26</b>	<b>0,4</b>	<b>3,6</b>	<b>0,07</b>
<i>10=d+b</i>	<b>0,5</b>	<b>0,2</b>	<b>1,9</b>	<b>0,09</b>
<i>11=bois</i>	<b>0</b>	<b>1,8</b>	<b>1,3</b>	<b>0,02</b>

<i>12=15.15</i>	<b>0,38</b>	<b>0,1</b>	<b>2,7</b>	<b>0,44</b>
<i>13=ouvon</i>	<b>0,18</b>	<b>0,5</b>	<b>2,9</b>	<b>0,67</b>
<i>14=bouvon</i>	<b>0,48</b>	<b>0</b>	<b>3,5</b>	<b>0,56</b>
<i>15=bous</i>	<b>0</b>	<b>0,6</b>	<b>1,6</b>	<b>0,62</b>
<i>16=netre</i>	<b>0,55</b>	<b>0</b>	<b>5,1</b>	<b>0,39</b>

Tableau N° 5 : Limites recommandées en éléments traces dans les usées épurées destinées à l'irrigation [91]

<b>Constituent</b>	<b>Utilisation à long terme (mg/l)</b>	<b>Court terme (mg/l)</b>
Aluminium	5.0	20.0
Arsenic	0.10	2.0
Béryllium	0.10	0.5
Bore	0.75	2.0
Cadmium	0.01	0.05
Chrome	0.1	1.0
Cobalt	0.05	5.0
Cuivre	0.2	5.0
Fluor	1.0	15.0
Fer	5.0	20.0
Plomb	5.0	10.0
Lithium	2.5	2.5
Manganèse	0.2	10.0
Molybdène	0.01	0.05
Nickel	0.2	2.0
Sélénium	0.02	0.02
Vanadium	0.1	1.0
Zinc	2.0	10.0

Tableau N° 6 : Teneurs et flux des éléments traces métalliques pour les boues et pour les sols [91]

<b>Constituent</b>	<b>Valeur limite dans les boues (mg/Kg MS)</b>	<b>Valeur limite dans les sols (mg/Kg MS)</b>
Cd	20	2
Cr	1000	150
Cu	1000	100
Hg	10	1
Ni	200	50
Pb	800	100
Zn	3000	300
Cr+Cu+Ni+Zn	4000	-

## **2. Préparation des échantillons :**

Le contrôle de qualité d'une boue d'épuration n'a de sens que si un échantillon moyen et représentatif est prélevé. Les directives suivantes pour le prélèvement et le séchage des boues d'épuration sont à suivre.

### **2.1. Siccité des boues :**

a) Préparer de l'échantillon sans acide oxalique pour la détermination de la matière sèche :

- Peser le récipient utilisé pour le séchage des boues (= tare)
- Peser 100 grammes de l'échantillon moyen de boues
- Sécher la boue dans une étuve ventilée à 100-105°C jusqu'à ce qu'elle devienne friable, puis encore pendant 3 heures
  - Il est recommandé de placer ensuite l'échantillon sec dans un dessiccateur afin de permettre son refroidissement. La pesée à température ambiante est plus aisée et plus précise
- Peser le récipient avec la substance séchée
- Reporter les données sur le formulaire "Protocole"

## **2.2. Modes opératoires :**

### **2.2.1. MES : (dosage des MES par centrifugation norme NF T 90-105 – 2)**

#### **2.2.1.1. Principe :**

Les matières en suspension sont séparées par centrifugation elles sont recueillies et séchées à 105°C puis pesées.

#### **2.2.1.2. Protocole :**

Prélever un volume d'échantillon de l'ordre de 200 ml de l'eau à analyser (eau brut ou eau épurée).

- répartir les 200 ml d'eau sur les quatre godets de la centrifugeuse (50 ml d'eau par godet).
- recueillir le culot de centrifugation dans une capsule en porcelaine préalablement séché dans une étuve à 105°C et tarée.
- rincer le godet de la centrifugeuse deux fois avec de l'eau distillée chaque fois et recueillir les eaux de rinçage dans la capsule.
- sécher la capsule et sont contenu à 105°C jusqu'à masse constante.
- laisser refroidir dans un dessiccateur et peser.

#### **2.2.1.3. Matériels et méthodes :**

- matériel courant de laboratoire.
- centrifugeuse (3000 tours / 20 minutes).
- étuve à 105°C

#### **2.2.1.4. Résultats :**

$$\text{MES} = \frac{P - P_0}{V} \times 10^6 = \text{mg/l}$$

P : poids de la capsule après évaporation du résidu (g).

P<sub>0</sub> : poids de la capsule vide (g).

V : volume de l'échantillon (ml).

### **2.2.2. DCO : (dosage de la DCO par spectrophotométrie certifié)**

#### **3.2.2.1. Principe :**

On évalue la quantité d'O<sub>2</sub> en (mg/l) par les réactions d'oxydation, à partir de la mesure du résidu de réactifs au bout de deux heures, l'oxydation s'effectue à chaud, en milieu acide, en présence d'un excès d'oxydant.

**2.2.2.2. Protocole :**

- prélever 2ml de l'eau à analyser (eau brut ou eau épurée) et le rajouter au tube de réactif à DCO.
- placer le tube 2h à 105°C
- après refroidissement, lire directement la DCO au spectrophotomètre

**2.2.2.3. Matériel et méthodes**

- tube réactifs à DCO (gamme 0-150 mg/l ou 0-1500 mg/l).
- pipette 2 ml.
- réacteur à DCO 150°C.
- spectrophotomètre

**2.2.2.4. Résultats :**

Lecture directe des résultats sur l'écran.

**2.2.3. DBO<sub>5</sub>**

**Principe :**

Le système de mesure, consiste en une bouteille d'échantillon et la sonde DBO qui sont des systèmes fermées. Le volume de gaz au-dessus de l'échantillon dans la bouteille d'échantillon contient une quantité définie d'oxygène. Pendant le test DBO, les bactéries de l'échantillon d'eau usées consomment l'oxygène dissous dans l'échantillon.

Il est remplacé par l'oxygène provenant du volume de gaz dans la bouteille d'échantillon. En même temps, du dioxyde de carbone est produit par les bactéries et doit être retiré du système

Ceci est réalisé par l'addition de quelques pastilles d'hydroxyde de sodium contenu dans des coupelles hermétiques de la bouteille d'échantillon.

Ceci produit une chute de la pression mesurée par la sonde DBO, et qui apparait sur l'affichage en mg/l DBO.

**2.2.3.1. Protocole :**

- la valeur de DBO d'un échantillon dépend de la charge en matières organiques qui peut être vraiment considérable. Pour cette raison, la sonde DBO est adaptées aux volumes d'échantillon puisque la station de Souk-Ahras fonctionne à faible charge nous allons choisir les gammes et les volumes en fonction du tableau suivant :

Tableau N<sup>0</sup>7 : la valeur de DBO d'un échantillon dépend de la charge en matières organiques

<b>Nature de l'effluent</b>	<b>Gamme de mesure DBO mg /l</b>	<b>Volume de l'échantillon en ml</b>	<b>facteur</b>
Eau brute	0 – 800	94	20
Eau épurée	0 – 40	428	1

- porter l'échantillon préparé au préalable (mesure de pH, mélanger, homogénéiser l'échantillon) à la température de test qui est de 20 ° C. La meilleure façon d'obtenir cette température est de placer l'unité DBO dans un incubateur, où l'échantillon est agité en continu, l'agitation est fournie par de petits agitateurs magnétiques qu'on place au fond des bouteilles.

- placer la sonde DBO sur les bouteilles d'échantillon et resserrer soigneusement les coupelles. Ceci est très important car le système ne doit fuir d'aucune façon .

- appuyer simultanément sur les touches S et M de la sonde pendant 2 secondes, l'affichage montrera 00. Toute valeur qui pourrait être en mémoire sera effacée.

- une fois que la température de mesure est atteinte (après 1 heure au plus tôt, après 3 heures au plus tard), les capteurs commencent à mesurer la DBO.

#### **2.2.3.2. Matériels et méthodes :**

- oxytop.

- éprouvettes.

- incubateur.

- hydroxyde de sodium.

#### **2.2.3.3. Résultats :**

- la sonde DBO prend une mesure par 24 heures pendant au maximum 5 jours ; la valeur mesurée est stockée automatiquement dans la fonction mémoire. En appuyant sur la touche M (pendant une seconde), la valeur du jour correspondant peut être appelée.

- Après 5 jours, toutes les valeurs individuelles sont affichées. En appuyant sur la touche S, ces valeurs sont affichées en enchaînement fixe.

1<sup>er</sup> affichage : premier jour de mesure

2<sup>ème</sup> affichage : valeur mesurée du 1<sup>er</sup> jour

En appuyant à nouveau sur la touche S, les valeurs mesurées respectives des 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> jours s'affichent automatiquement, ces dernières doivent alors être multipliées par le facteur correspondant en fonction du volume de l'échantillon .

### 2.2.4. pH

#### 2.2.4.1.Principe

Pour mesurer le pH, il faut disposer d'une électrode combinée, après étalonnage avec des solutions tampons (pH=7, pH=10) en tremper cette dernière dans la solution à mesurer

#### 2.2.4.2. Protocole :

- nettoyer la membrane de la sonde avec de l'eau distillée à chaque utilisation et tamponner légèrement avec du papier hygiénique.
- étalonner l'électrode avec les solutions tampon.
- plonger l'électrode dans la solution à mesurer.

#### 2.2.4.3. Matériels et méthodes :

- solutions tampon.
- matériels courants de laboratoire. (Bécher...etc.)
- eau distillée + papier hygiénique (nettoyage de l'électrode)

#### 3.2.4.4. Résultats

Lecture directe des résultats sur l'écran. En plus du pH l'appareil nous indique également la température de l'eau en °C

### 2.3. Les métaux lourds :

**2.3.1. Cadmium :** spectroquant Merck test cellule Nr 1. 14834 .0001, méthode utilisée pour l'eau brute et l'eau épurée.

**2.3.1.1. Gamme :** 0.025 – 0.75 mg /l Cd / 25 – 750 µg / l Cd.

#### 2.3.1.2.Protocole :

- placer le blanc fournit avec les réactifs dans le spectrophotomètre, presser ZERO.
- sortir le blanc .
- ajouter 5 ml d'échantillon à un tube de réactif.
- fermer, secouer.
- ajouter 0.2 ml du réactif Cd – 1k.

- fermer, secouer.
- ajouter une cuiller du réactif Cd- 2k.
- fermer, secouer.
- placer l'échantillon dans le spectrophotomètre presser TEST, attendre une période de réaction de 2 mn.

**2.3.1.3. Résultats :** le résultat s'affiche comme Cadmium.

**2.3.2. Nickel :** test réactif méthode utilisée pour l'eau brute et l'eau épurée

**2.3.2.1. Gamme : 0.02 – 1mg/l.**

**2.3.2.2. Protocole :**

- remplir une cellule de 50 mm avec l'échantillon d'eau.
- placer la cellule dans le spectrophotomètre, presser ZERO.
- sortir la cellule de l'appareil.
- vider la cellule la faire sécher.
- remplir un bécher avec 10 ml d'échantillon.
- ajouter deux cuillers de Nickel 51 N° 8, bien secouer pour faire dissoudre.
- remplir la cellule avec la solution test colorée.
- placer la cellule dans l'appareil, presser TEST attendre une période de réaction de 3mn.

**3.3.2.3. Résultats :** le résultat s'affiche directement sur l'écran en mg /l Nickel.

**2.3.3. Cuivre :** avec tablettes méthode utilisée pour l'eau brute et l'eau épurée

**2.3.3.1. Gamme : 0.05 – 1mg/ l Cu**

**2.3.3.2. Protocole :**

- remplir une cellule de 50 mm avec l'échantillon d'eau.
- placer la cellule dans le spectrophotomètre, presser ZERO.
- vider la cellule, la faire sécher.
- remplir un bécher avec 10 ml d'échantillon.
- ajouter une pastille de Cuivre en tablette N°1 après l'avoir piller au moyen d'un mortier.
- fermer, secouer.
- placer l'échantillon dans l'appareil, presser la touche TEST.

**2.3.3.3. Résultats :** le résultat s'affiche en mg/l Cu.

**2.4. Analyses microbiologique :**

**2.4.1. coliformes fécaux :**

**2.4.1.1. Protocole :**

La recherche de coliformes conte deux temps :

- la recherche préemptive des coliformes.
- la recherche confirmative des coliformes fécaux, et éventuellement des autres coliformes.

**- Test présomptif :**

Il est effectué en utilisant le bouillon lactosé au pourpre de bromocresol (BCPL) tous les tubes sont munis de cloches de durham pour déceler le dégagement éventuel de gaz dans le milieu.

- on ensemence un flacon contenant 50 ml de BCPL double concentration avec 50 ml d'eau.
- 5 tubes de 10 ml de BCPL simple concentration avec 10 ml d'eau.
- 5 tubes de 10 ml de BCPL simple concentration avec 1ml d'eau

La lecture se fait après 48 h d'incubation. Tous les tubes présentant un aspect trouble de couleur jaune et du gaz dans la cloche sont considérés comme positifs, c'est-à-dire contenant des coliformes totaux.

On note le nombre de tubes positifs dans chaque série, et on se rapporte aux tables NPP pour obtenir le nombre de coliformes totaux présents dans 100 ml.

**- Test confirmatif :**

A partir de chaque bouillon BCPL positif pour la recherche de coliformes totaux on ensemence 2 à 3 gouttes dans un tube de milieu indole mannitol (milieu de schubert) muni d'une cloche de durham.

- incuber à 44 °C.
- après 24 h d'incubation, tous les tubes présentent une culture, du gaz dans la cloche et une réaction indole positive (anneau rouge en surface) après addition de réactif d'Erlich Kovacs sont considérés comme positifs, c'est-à-dire comme contenant des coliformes fécaux dans 100 ml d'eau.

**- Streptocoques fécaux :**

On recherche généralement les streptocoques du groupe D (Entérocoques) qui sont considérés comme témoin de pollution fécale, car tous ont un habitat fécal.

**-Test présomption :**

La recherche se fait en bouillon à l'azide de sodium (bouillon de Rothe) simple et double concentration.

On ensemence :

- 1 flacon contenant 50 ml de bouillon de Rothe double concentration avec 50 ml d'eau.
- 5 tubes de 10 ml de bouillon de Rothe double concentration avec 10 ml d'eau.
- 5 tubes de 10 ml de bouillon de Rothe simple concentration avec 10 ml d'eau incubé à 37°C pendant 48 heures.

Les tubes présentant un louche microbien seront considérés comme contenir un streptocoque fécal. Ils seront obligatoirement soumis au test confirmatif.

On note le nombre de tubes positifs dans chaque séries.

**-Test confirmatif :**

A partir des tubes de bouillon de Rothe positifs, ensemencer 2 à 3 gouttes dans un bouillon à l'éthyle violet et azide de sodium (EVA ou Listky) incubé à 37 °C pendant 24 heures.

Tous les tubes présentant une culture et un jaunissement seront considérés comme positifs. On note généralement la présence dans le fond des tubes d'une pastille violette.

On note le nombre le tubes positifs dans chaque série, et se rapporter aux tables du NPP, pour connaître le nombre de streptocoques fécaux présent dans 100 ml d'eau.

**2.4.2. Recherche de germes pathogènes :**

**2.4.2.1. Vibrion cholérique :**

Principe : après enrichissement en milieu hypersalé et isolement sur milieu sélectif, l'identification est basée essentiellement sur les épreuves biochimiques et immunologiques.

Phase du prélèvement et du 1<sup>er</sup> enrichissement

Prélever 450 ml d'eau directement dans un flacon contenant 50 ml de milieu de culture (eau peptonee concentrée 10 fois). Cette phase constitue le 1<sup>er</sup> enrichissement.

Bien boucher les flacons et les agiter pour les homogénéiser, puis les incubés pendant 18 h à 37 °C.

- à partir du premier enrichissement (EPA I) effectuer un isolement sur gélose nutritive alcaline biliée (GNAB I) et un 2<sup>ème</sup> enrichissement en portant 1ml d'EPA I sur eau peptonee alcaline en tube (EPA II).

**2.4.2.2. Phase du 2<sup>ème</sup> isolement :**

A partir du 2<sup>ème</sup> enrichissement EPA II, effectuer un isolement sur GNAB (GNAB II)

Phase d'identification des colonies à partir du GNAB I ou GNAB II

A partir des colonies suspectes présentes sur les boîtes de GNAB, procéder à une identification rapide pour pouvoir communiquer un résultat préemptif puis une identification complète selon les techniques habituelles.

Sur GNAB les colonies de vibron cholérique ont 1 à 1.5 mm de diamètre ; elles sont transparentes lisses, d'aspect légèrement bleuté.

A partir de chaque colonie suspecte prélever à l'aide d'un fil de platine une partie de la colonie sur un tube de Kligler (KIA) et sur l'autre partie faire une recherche d'oxydase

Incuber des tubes de KIA 16 heures à 37 °C

A partir des tubes de KIA présentant l'aspect suivant :

- culot jaune
- pente rose dans les premières heures (les vibrions cholériques est lactose + tardivement ONPG)
- absence d' H<sub>2</sub>S
- absence de gaz

Faire une recherche d'oxydase et une agglutination en eau physiologique et au sérum polyvalent anticholérique. Deux cas se présentent :

1°) si oxydase positive

Agglutination positive au sérum anticholérique polyvalent et négative en eau physiologique la souche et du vibron cholérique.

2°) absence d'agglutination en eau physiologique et au sérum : résultat négatif.

### **2.4.3. Recherche des salmonella :**

#### **2.4.3.1 Principe :**

la recherche des salmonelles nécessite quatre phases successives

Pré – enrichissement :

Incubation des échantillons dans un milieu liquide non sélectif à 37 °C

#### **2.4.3.2. Enrichissement :**

Inoculation de deux milieux liquides sélectifs avec milieu incubé du pré – enrichissement, puis incubation respectivement à 37°C ou à 42 – 43 °C.

### 2.4.3.3. Isolement :

Inoculation des deux milieux d'enrichissement sur des milieux d'identification solides et sélectifs qui, après incubation à 37°C , sont examinés pour contrôler s'il y a présence de colonies, présumées être des salmonella en raison de leurs caractéristiques.

### 2.4.4. Recherche de parasites :

Centrifugation de l'échantillon d'eau (eau brut , eau épurée ) observation du culot au microscope , comptage des œufs d'helminthes/l

### Analyses de boues :

Analyses de boues réalisées au niveau du laboratoire central de l'ONA (office national de l'assainissement) certifié ISO 14 .001 version 2004 avec autorisation d'exploitation délivrée par le centre algérien du contrôle de qualité et d'emballage (CACQE), le laboratoire dispose d'un spectromètre *Varian 50 AA* avec atomisation par flamme

Principe : la spectrométrie AAS consiste à vaporiser l'échantillon et à le chauffer à l'aide d'une flamme

### Protocole :

La flamme est dirigée vers une lumière émise par une lampe appropriée émettant les longueurs d'ondes caractéristiques de l'élément recherché. En traversant la flamme, les ondes lumineuses – dont les longueurs d'ondes correspondant à l'élément dosé – sont absorbées par les ions excités présents dans la flamme. L'absorption est mesurée à l'aide d'un prisme dispersif et d'une cellule photoélectrique : elle est directement proportionnelle à la concentration de l'élément. Lorsque les atomes d'un élément ont été excités, leur retour à l'état fondamental s'accompagne de l'émission de lumière d'une fréquence F bien définie et propre à cet élément. Le même élément dispersé dans une flamme possède la propriété d'absorber tout rayonnement de même fréquence F. Il en résulte une absorption du rayonnement incident lié à la concentration de l'élément considéré.

### **\*\* Détermination de la teneur totale des métaux lourds dans les sols**

Pour la détermination de la teneur totale des métaux lourds dans les sols ou dans les boues , il a été réalisé une dissolution totale du soles. Pour ce faire , 1g de sol est introduit dans un bécher de 250 ml. On ajoute 15 ml d'acide perchlorique. Le bécher , fermé à fermé à l'acide d'un verre de montre, est chauffé avec son contenu au bain de sable à 300C° pendant 1heure, puis laissé refroidir pendant 8 à 15 min . La solution obtenue à l'issue de cette attaque acide est filtrée puis transvasée dans une fiole de 50 ml . on la dilue en ajoutant de l'eau jusqu'au trait de jauge. On procéde ensuite à la détermination des teneurs des métaux lourds par spectro métrie d'absorption atomique .

85 .37g(P<sub>O</sub>) ....24h.....90.05 g(P<sub>2</sub>) .....4h .....89.77 g(P<sub>3</sub>)

70.42g(P<sub>0</sub>) .....24h.....75.08 g(P<sub>2</sub>) .....4h .....74.83 g(P<sub>3</sub>)

$$P_1 = (P_0) + 5g (\text{Sol})$$

$$H\% = (P_1 - P_2 / P_1 - P_0) * (100) \text{ l'humidité}$$

$$P_2 - P_3 = P_4$$

$$MO = (P_4 * 100 / P_1)$$

Echantillon = 5g

### **3. Méthodes de dosages :**

#### **3.1. Spectrophotométrie d'absorption atomique (S.A.A.) :**

##### **3.1.1. Principe :**

La technique de la S.A.A. est couramment utilisée pour les dosages des métaux lourds. Le principe de cette méthode est basé sur la propriété d'absorption d'un quantum d'énergie à une certaine longueur d'onde donnée (pour le cuivre, le zinc, le fer, le cadmium, le plomb, le chrome,  $\lambda = 324,7 \text{ nm}$ ,  $\lambda = 213,9 \text{ nm}$  et  $248,3 \text{ nm}$ ,  $\lambda = 228,88 \text{ nm}$ ,  $\lambda = 283 \text{ nm}$ ,  $\lambda = 357,9 \text{ nm}$  respectivement) par les atomes neutres en fonction de leur concentration dans la solution à analyser [18].

##### **3.1.2. Appareillage :**

Le spectromètre d'absorption atomique comprend essentiellement une lampe à cathode creuse spécifique au métal à analyser et d'un ensemble nébuliseur, brûleur, air acétylène, l'un système optique. Il est équipé d'un système informatique pour analyser les données. L'appareil est du type : SHIMADZU 6200.

##### **3.1.3. Préparation de la gamme étalon :**

Ajouter à chaque solution portée à l'analyse l'acide nitrique (1ml de HNO<sub>3</sub>). Ensuite selon la valeur de l'absorption lue, on dilue la solution en lui ajoutant de l'eau distillée (sachant d'avance son volume). Les résultats sont lus directement sur l'appareil puisqu'il est préréglé sur la courbe d'étalonnage en mg des éléments présente [7,18].

### 3.1.4. Etablissement de la courbe d'étalonnage $A = f(C_{Cu^{2+}})$ pour l'analyse de cuivre:

#### 3.1.4.1. Réactifs :

- Acide nitrique (d=1,4).
- Solution mère de **Cuivre** à  $1\text{ g L}^{-1}$  :
- Solution fille étalon de cuivre à  $10\text{ mg L}^{-1}$
- Eau distillée

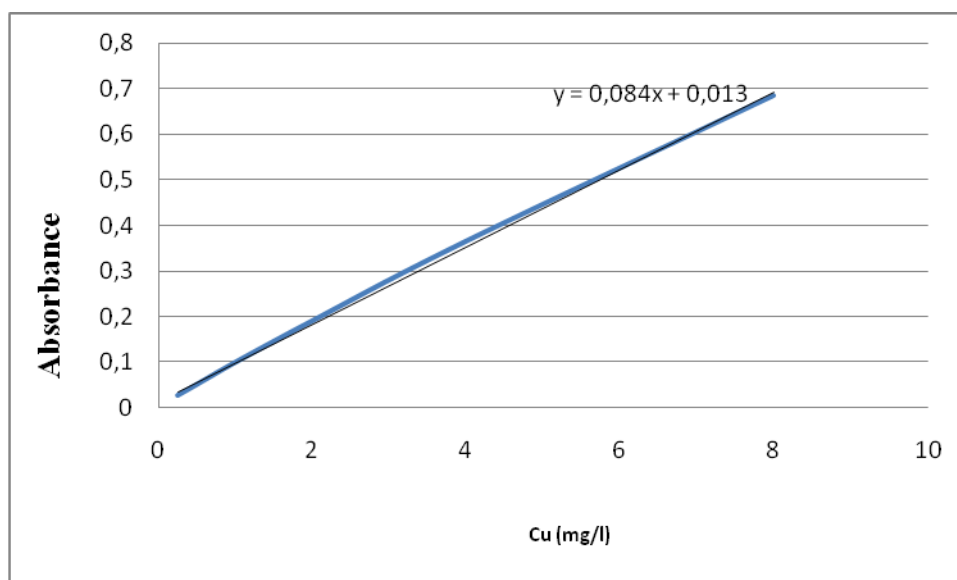
##### 3.1.4.1.1. Mode opératoire :

On nébulise les solutions étalons dans une flamme air-acétylène, en intercalant de l'eau distillée. On effectue les lectures à la longueur d'onde de 324,7 nm. Les résultats des absorbances sont regroupés dans le tableau suivant :

**Tableau N° 8:** Résultats de mesure des absorbances du cuivre.

$C_{Cu^{2+}}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0,25	0,5	1	2	4	8
A	0,0265	0,0506	0,0991	0,1900	0,3649	0,6850

#### 3.1.4.1.2. Courbe d'étalonnage :



**Figure (1) :** Courbe d'étalonnage de cuivre

### 3.1.4.2. Etablissement de la courbe d'étalonnage $A = f(C_{Zn^{2+}})$ pour l'analyse de zinc :

#### 3.1.4.2.1. Réactifs :

- Acide nitrique (d=1,4).
- Solution mère de **Zinc** à  $1\text{ g L}^{-1}$ :
- Solution fille étalon de Zinc à  $10\text{ mg L}^{-1}$
- Eau distillée

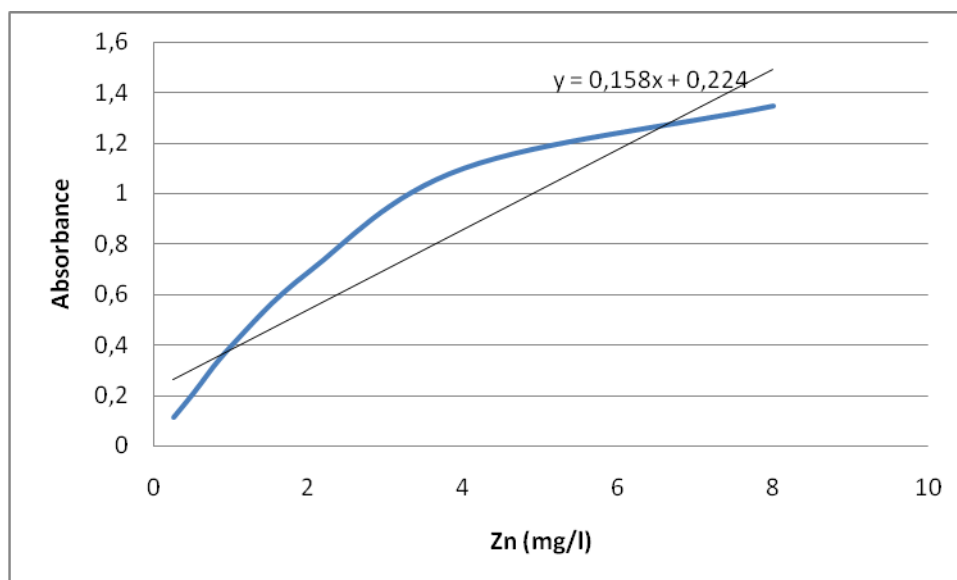
#### 3.1.4.2.2. Mode opératoire :

On nébulise les solutions étalons dans une flamme air-acétylène, en intercalant de l'eau distillée. On effectue les lectures à la longueur d'onde de 213,9 nm. Les résultats des absorbances sont regroupés dans le tableau suivant :

**Tableau N° 9:** Résultats de mesure des absorbances du Zinc.

$C_{Zn^{2+}}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0,25	0,5	1	2	4	8
A	0,1109	0,2050	0,3962	0,6891	1,0981	1,3448

#### 3.1.4.2.3. Courbe d'étalonnage :



**Figure (2):** Courbe d'étalonnage de zinc

### 3.1.4.3.Établissement de la courbe d'étalonnage $A = f(C_{Fe})$ pour l'analyse de fer :

#### 3.1.4.3.1. Réactifs :

- Acide nitrique (d=1,4).
- Solution mère de **fer** à  $1\text{ g L}^{-1}$  :
- Eau distillée
- Solution fille étalon de à  $10\text{ mg L}^{-1}$

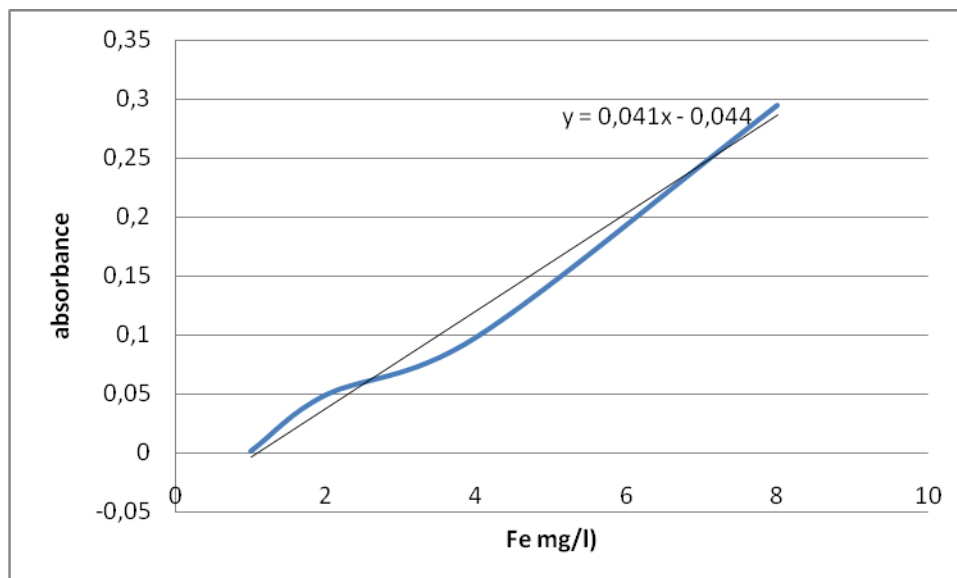
#### 3.1.4.3.2.Mode opératoire :

On nébulise les solutions étalons dans une flamme air-acétylène, en intercalant de l'eau distillée. On effectue les lectures à la longueur d'onde de 248,3 nm. Les résultats des absorbances sont regroupés dans le tableau suivant :

*Tableau N° 10:* Résultats de mesure des absorbances du Fer.

$C_{Fe}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	1	2	4	8
A	0,001	0,049	0,098	0,295

#### 3.1.4.3.3.Courbe d'étalonnage :



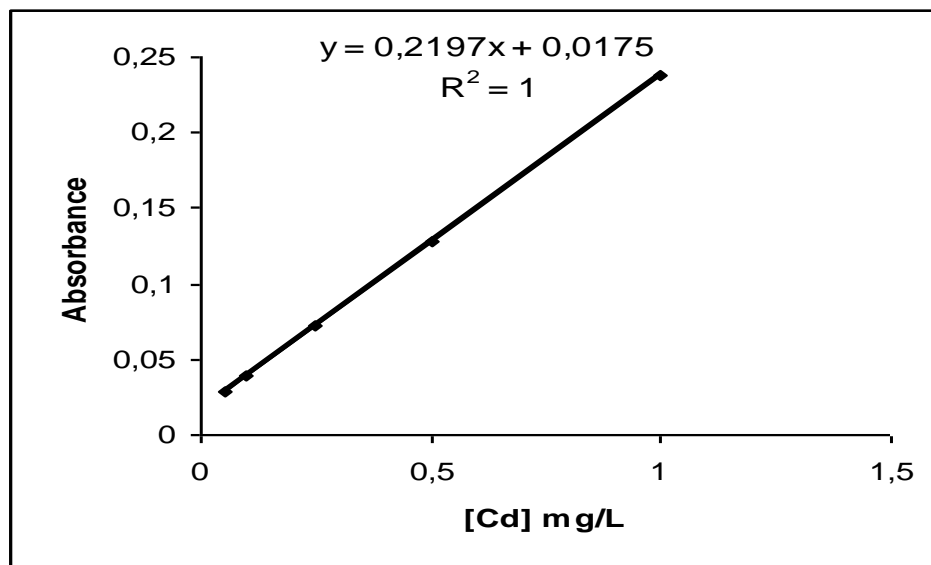
**Figure (3) :** Courbe d'étalonnage de fer

### 3.1.4.4. Etablissement de la courbe d'étalonnage $A = f(C_{Cd})$ pour l'analyse de cadmium

#### 3.1.4.4.1. Réactifs :

- Acide nitrique (d=1,4).
- Solution mère de **cadmium** à  $1\text{ g L}^{-1}$  :
- Eau distillée
- Solution fille étalon de à  $10\text{ mg L}^{-1}$

Les résultats obtenus nous ont permis de construire la courbe d'étalonnage donnée par la figure (4) :



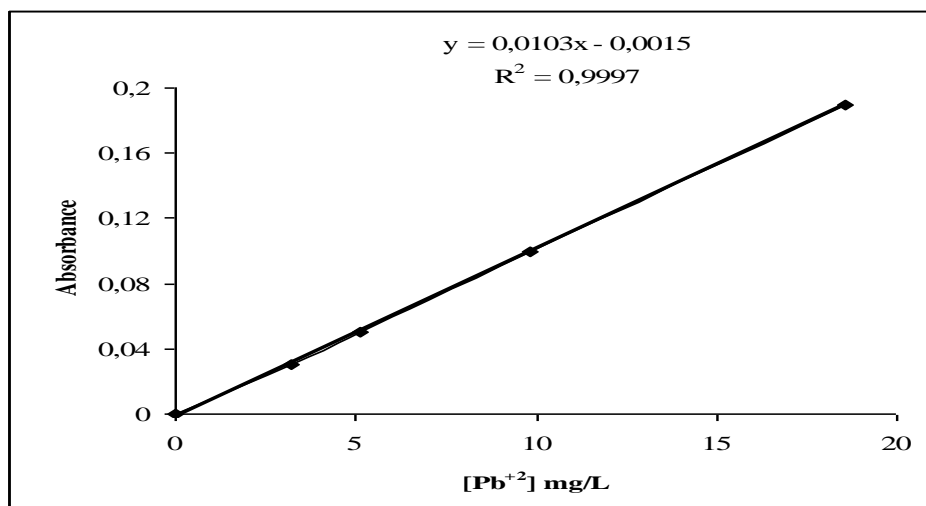
**Figure (4) :** Courbe d'étalonnage du cadmium

### 3.1.4.5. Etablissement de la courbe d'étalonnage $A = f(C_{Pb})$ pour l'analyse de plomb

#### 3.1.4.5.1. Réactifs :

- Acide nitrique (d=1,4).
- Solution mère de **plomb** à  $1\text{ g L}^{-1}$  :
- Eau distillée
- Solution fille étalon de à  $50\text{ mg L}^{-1}$

Les résultats obtenus nous ont permis de construire la courbe d'étalonnage donnée par la figure (05) :



**Figure (5) :** Courbe d'étalonnage du plomb.

### 3.1.4.6. Etablissement de la courbe d'étalonnage $A = f(C_{Cr})$ pour l'analyse du chrome totale:

#### 3.1.4.6.1. Réactifs :

- Acide nitrique (d=1,4).
- solution mère étalon de chrome à 1 g/l :
- Eau distillée
- Solution fille étalon de chrome à 20 mg L :

#### 3.1.4.6.2. Mode opératoire :

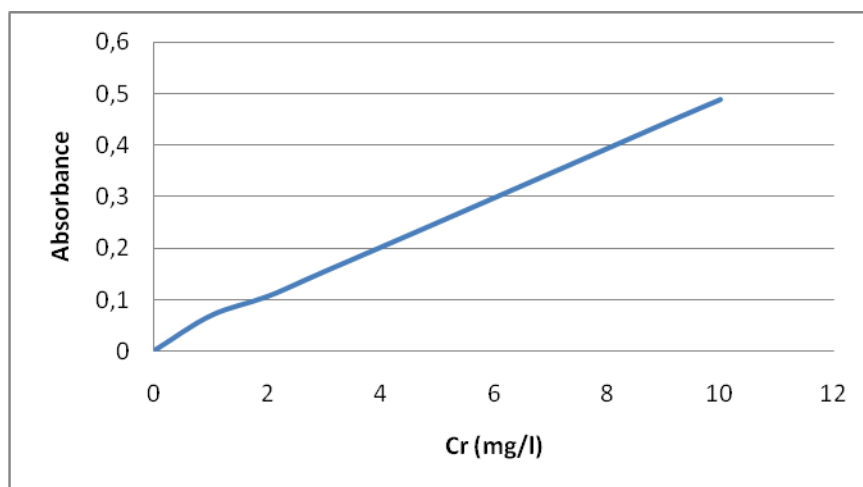
On nébulise les solutions étalons dans une flamme air-acétylène, en intercalant de l'eau distillée.

On effectue les lectures à la longueur d'onde de 357,9 nm. Les résultats des absorbances sont regroupés dans le tableau suivant

**Tableau N° 11:** Résultats de mesure des absorbances du chrome.

$C_{Cr}$ mg/L	0	1	2	3	5	7	9	10
A	0,001	0,069	0,106	0,154	0,249	0,345	0,441	0,488

### 3.1.4.6.3. Courbe d'étalonnage :



**Figure (6) :** Courbe d'étalonnage pour l'analyse du chrome.

[205] **V. Alexéev**, Analyse quantitative, Edition Mir, Moscou, (1980).

[206] **J. Rodier**. L'analyse de l'eau. Dunod Paris. (1978).