

MEMOIRE EN REPONSE

Enquête publique du 23 septembre au 25 octobre 2019

A l'attention de la commission d'enquête

Monsieur Michel LAFFAILLE (Président)

Monsieur Alain DISANT (membre)

Monsieur Pascal VEUILLE (membre)

Département de l'Eure-et-Loir

Demande d'Autorisation Environnementale

Périmètre d'épandage des boues de l'usine d'épuration Seine aval

Document réalisé par SEDE

V1 - novembre 2019



BIARCUEL - Fils d'Assainissement Agréés
de Matières Fertilisantes Recyclées
Caractéristiques sur demande

VALIDATION DU MEMOIRE EN REPOSE DEPARTEMENT DE L'EURE-ET-LOIR
--

Nom du client : Usine d'épuration Seine Aval SIAAP -Achères (78)

Valider :

⇒ Le mémoire en réponse (version 1 / novembre 2019)

Dossier établi par :	Dossier approuvé par :	Dossier validé par :
Lizem KEREVER SEDE Environnement Chargée d'Etudes	Gwenalle SERY SEDE Environnement Responsable Pôle Etudes	Carine CORVSY SIAAP Pilote projet UPBD
Maisons-Laffitte le : 15/11/2019 	Maisons-Laffitte le : 15/11/2019 	Maisons-Laffitte le : 18/11/2019 

Commentaires :

SOMMAIRE

1 Préambule	10
2 Introduction	10
3 Bilan de la phase de communication	12
3.1 Bilan de la concertation préalable avec les administrations départementales	13
3.2 Bilan des rencontres des communes concernées par le périmètre d'épandage des boues de Seine aval	14
3.3 Bilan des rencontres des contacts-clés du département de l'Eure-et-Loir	16
3.4 Bilan de la communication avec les communes et les contacts-clés	18
3.5 Visite de l'usine Seine aval	18
3.6 Plaquette de communication	19
3.7 Conclusion	20
4 Observations et thèmes abordés	21
4.1 Thème 1 : Le refus des boues venues de l'extérieur	23
4.1.1 Pratiques agricoles	23
4.1.2 La définition des ZNT	23
4.1.3 Mutualisation des déchets	24
4.1.4 Non concurrence aux boues locales	24
4.1.5 Risques sanitaires et environnementaux	24
4.2 Thème 2 : L'acceptation des boues avec des réserves	25
4.2.1 Les mesures prises pour diminuer les odeurs	25
4.2.2 Compatibilité avec les zones naturelles	25
4.3 Thème 3 : La composition des boues et leur toxicité	27
4.3.1 La composition des boues de Seine aval	27
4.3.1.1 Origine des boues de Seine aval	27
4.3.1.2 Composition des boues de Seine aval	28
4.3.1.2.1 Les éléments-traces	28
4.3.1.2.2 Hormones et résidus médicamenteux	32

4.3.1.2.3 Substances émergentes	33
4.3.1.2.4 Les pesticides	34
4.3.2 Les analyses RSDE dans les eaux et dans les boues	34
4.3.3 Etat des lieux des réglementations sur les micropolluants	35
4.3.4 Une filière maîtrisée et des contrôles appliquées à la filière	36
4.3.5 Politique qualité de la filière d'épandage des boues de Seine aval	37
4.3.6 Le principe de la valorisation	39
4.3.7 Un contrôle des micropolluants à la source	39
4.3.8 Impact des épandages sur les organismes vivants (flore, faune sauvage, faune du sol)	40
4.3.9 Protection de la ressource en eau	41
4.3.9.1 Protection des eaux de surface et souterraines	41
4.3.9.1.1 Les dispositions face au risque de pollution des eaux des surface	41
4.3.9.1.2 Les dispositions face au risque de pollution des eaux souterraines	42
4.3.9.2 Les captages d'Alimentation en Eau Potable (AEP)	42
4.3.9.3 Les Aires d'Alimentation de Captage prioritaire (AAC)	43
4.3.9.3.1 Qu'est ce qu'une AAC ?	43
4.3.9.3.2 Comment protéger une AAC ?	44
4.3.10 Suivi des sols	45
4.3.11 Fragilité des sols	46
4.3.12 Les risques liés à la présence d'agents pathogènes dans les boues	47
4.4 Thème 4 : Le recul d'expérience et le principe de précaution	48
4.4.1 Le recul d'expérience	48
4.4.1.1 Intérêts agronomiques et écosystémiques des produits résiduaire organiques	48
4.4.1.2 Evaluation des risques sanitaires liés au retour au sol des boues d'épuration	49
4.4.1.3 Bilan et perspectives réglementaires	49
4.4.1.4 Le programme « 4 pour mille »	50
4.4.1.5 Le retour au sol et l'économie circulaire	50
4.4.1.6 Les états généraux sur l'alimentation	52
4.4.2 Le principe de précaution	53

4.4.2.1 Définition et application	53
4.4.2.1.1 Le principe de précaution dans la loi constitutionnelle française	53
4.4.2.1.2 Principe de précaution et principe d'inaction	54
4.4.2.1.3 Proposition du Sénat visant à équilibrer le « principe de précaution	55
4.4.2.2 Une réglementation guidée par le principe de précaution	55
4.4.3 La traçabilité des boues de Seine aval et l'exécution de la filière	56
4.4.3.1 Analyses des boues de Seine aval	56
4.4.3.2 Stockage et traçabilité	57
4.4.3.3 Les commandes de boue auprès des agriculteurs	57
4.4.3.4 Evacuation et livraison des boues de Seine aval	57
4.4.3.5 Les épandages	58
4.4.4 Fonds de garantie	58
4.4.5 Pollution liée à des épandages de boues ?	59
4.5 Thème 5 : les atteintes à la santé	60
4.5.1 L'hygiénisation des boues	60
4.5.2 Impact des épandages sur la santé humaine	65
4.5.3 Impact des épandages sur la santé animale	66
4.5.4 Le calendrier d'épandage	66
4.5.5 Les risques liées à la présence de substances indésirables	66
4.6 Thème 6 : Les principales nuisances constatées	67
4.6.1 Les nuisances liées au transport des boues	67
4.6.1.1 Une logistique maîtrisée	67
4.6.1.2 Responsabilité en cas de dégradation	68
4.6.2 Les nuisances liées aux odeurs des boues	68
4.6.3 Les nuisances liées à la présence des boues	69
4.7 Thème 7 : Les incidents sur la station d'Achères et le devenir des boues	70
4.8 Thème 8 : Les filières alternatives	71
4.8.1 Valorisation agricole par épandage agricole direct ou par compostage	71
4.8.2 Valorisation par incinération	72

4.8.3 Valorisation par méthanisation	72
4.8.4 Traitement par enfouissement en ISDND	73
4.9 Thème 9 : Le refus de certains cahiers des charges, la réglementation européenne et sa pérennité	74
4.9.1 La position des industries agroalimentaires	74
4.9.2 La réglementation européenne	76
4.9.2.1 La Directive européenne n°86-278	76
4.9.2.1.1 Les préconisations de la directive	76
4.9.2.1.2 Les révisions en cours de la réglementation	77
4.10 Thème 10 : L'aptitude de certains sols	80
4.10.1 La constitution du périmètre d'épandage	80
4.10.2 L'aptitude des sols à l'épandage	80
4.10.2.1 Les règles d'épandage et d'entreposage	80
4.10.2.1.1 Les règles d'épandage	80
4.10.2.1.2 Les règles de l'entreposage	81
4.10.2.1.3 Épandage à proximité des habitations	81
4.10.2.1.4 Épandage à proximité de l'aqueduc de l'Avre	82
4.10.2.1.5 Épandage à proximité des cours d'eau et risque de ruissellement	82
4.10.2.2 La directive nitrates	82
4.10.3 La prise en compte des marnières et bétouilles	84
4.10.4 Épandage en AAC	86
4.10.5 Épandage en PPC	87
4.10.6 Risques liés à l'accumulation des éléments-traces	88
4.10.6.1 Accumulations dues aux épandages	88
4.10.6.2 Accumulations dues au stockage	88
4.10.7 Les substances émergentes	90
4.11 Thème 11 : L'exécution de la filière d'épandage	91
4.11.1 Les mesures pour limiter les nuisances	91
4.11.2 La mise en oeuvre de la filière	91
4.11.3 Épandage autour du hameau de Séreville	91

4.12 Thème 12 et 13 : l'information du public et des élus et questions diverses	93
4.12.1 Engagements et intérêts des agriculteurs	93
4.12.1.1 Les engagements	93
4.12.1.2 les intérêts	94
4.12.2 Répartition des communes soumises à enquête publique	94
4.12.3 Réglementation sur les enquêtes publiques	94
4.12.4 La communication menée par le SIAAP	96
4.12.5 Prise en compte des contraintes environnementales	96
5 Les questions formulées par la commission d'enquête	97

TABLE DES ILLUSTRATIONS

- Figure 1: Evolution de la dose d'épandage et du périmètre d'épandage des boues de Seine aval en Eure-et-Loir
- Figure 2: Principaux thèmes abordés lors des rencontres avec les mairies
- Figure 3: Principaux thèmes abordés lors des rencontres avec les contacts-clés
- Figure 4: Evolution des teneurs moyennes en ETM depuis 1996
- Figure 5: Evolution des teneurs moyennes en CTO depuis 1998
- Figure 6: Bilan des flux de contaminants entrants sur les sols agricoles de France métropolitaine
- Figure 7: Maîtrise de la filière de valorisation agricole directe
- Figure 8: Organismes intervenant dans le contrôle du site Seine aval
- Figure 9: Échelles de protection d'un captage d'eau potable
- Figure 10: Retour au sol et économie circulaire
- Figure 11: Les types de principes
- Figure 12: Agents pathogènes des boues d'épuration urbaines
- Figure 13: Facteurs influençant la durée de vie des agents pathogènes dans le sol
- Figure 14: Répartition des filières de valorisation en France en 2017
- Figure 15: Hiérarchie des modes de traitement
- Figure 16: Calendrier d'épandage
- Figure 17: Emplacement des marnières d'après la BDCavité
- Figure 18: Planning du suivi
- Figure 19: Projet STEPHOR
- Figure 20: Chronologie des trois études
- Figure 21: Bilan des exportations de phosphore par les cultures (dans les grains) par rapport à la quantité de phosphore apporté, et évolution du P disponible (P-résine + P NaHCO₃) dans le sol
- Figure 22: Incubation réalisée au laboratoire
- Figure 23: Phosphore disponible (P-résines + P-NaHCO₃) dans les sols fertilisés avec les boues ou le fertilisant minéral (super 46) dans les trois types de sol, après 167 jours d'incubation.
- Figure 24: Réalisation de l'expérimentation en serre
- Figure 25: Phosphore prélevé par le blé, le colza et l'orge après trois mois de croissance dans le calcosol et le luvisol fertilisés avec les boues ou l'engrais minéral.
- Figure 26: Synthèse des effets observés pour chaque étude
- Figure 27: Filières de valorisation des boues d'épuration en Europe
- Figure 28: Quelques exemples de valorisation agricole des boues en Europe
- Figure 29: Schéma d'organisation du contrôle des livraisons
- Figure 30: Distance d'isolement pour l'entreposage des boues de Seine aval
- Figure 31: Extrait du tableau 4 arrêté du 08/01/98 - Distances d'isolement et délais de réalisation des épandages

Tableau 1: Bilan de la concertation avec les administrations
Tableau 2: Bilan des rencontres avec les mairies concernées par le projet
Tableau 3: Bilan des rencontres avec les contacts-clés concernés par le projet
Tableau 4: Bilan de la phase de communication
Tableau 5: Participants à la visite du site Seine aval
Tableau 6: Synthèse des observations recueillies, selon les thèmes retenus, lors de l'enquête publique
Tableau 7: Composition en éléments fertilisants, ETM et CTO des boues de Seine aval
Tableau 8: Tests de toxicité et d'écotoxicité réalisés sur des boues de station d'épuration
Tableau 9: Vérification de l'hygiénisation des boues thermiques
Tableau 10: Position des groupements de producteurs vis-à-vis de l'épandage de boues d'épuration
Tableau 11: Position de Banette et Bonduelle vis-à-vis de l'épandage de boues d'épuration
Tableau 12: Position des institutions et fédérations nationales vis-à-vis de l'épandage de boues d'épuration
Tableau 13: Comparaison des documents réglementaires à remettre aux administrations compétentes (Arrêté du 8 janvier 1998 / directive du 12 juin 1986)
Tableau 14: Comparaison des valeurs limites en éléments-traces métalliques dans les boues et dans les sols (Document du 21/09/10 / Arrêté du 8 janvier 1998 / Directive du 12 juin 1986)
Tableau 15: Nouvelles aptitudes des parcelles
Tableau 16: Aptitude actualisée (2801745001)
Tableau 17: Epandage autour du hameau de Séreville (commune de Mainvilliers)
Tableau 18: Coût des filières de valorisation
Tableau 19: Schéma d'organisation du contrôle des épandages
Tableau 20: Part de différentes sources de contamination dans l'estimation des apports de cadmium sur les sols agricoles

GLOSSAIRE

AAC : Aire d'Alimentation de Captage
ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AEP : Alimentation en Eau Potable
AGPB : Association Générale des Producteurs de Blé et autres céréales
AGPM : Association de Groupements de producteurs de Maïs
AGREDE : AGRiculture et Épandage de DÉchets urbains et agro-industriels
AMPA : AMinométhylPhosphonique Acid
AMPERES : Analyse de Micropolluants Prioritaires dans les Rejets et Eaux Superficielles
ANIA : Association Nationale des Industries Alimentaires
ARS : Agence Régionale de Santé
AOX : Adsorbable Organic Halogen
BA : Bilan Agronomique
BCAE : Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales
BPA : Bonne Pratique Agricole
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
Cd : Cadmium
CGB : Confédération Générale de la Betterave
CLE : Commission Locale de l'Eau
CNJA : Centre National des Jeunes Agriculteurs
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
COFRAC : COmité FRançais d'Accréditation
COHV : Composés Organo-Halogénés Volatils
CSHPF : Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France
CTO : Composés-traces organiques
CTP : Comité Technique Permanent pour les boues d'épuration
Cu : Cuivre
Cr : Chrome
DDT (la) : Direction Départementale des Territoires
DEHP : Di(2-EthylHexyl) Phtalate
DREAL : Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement
DRIEE : Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Energie
EARL : Exploitation Agricole à Responsabilité Limitée
ETA : Entreprise de Travaux Agricoles
ETM : éléments-traces métalliques
ETP : EvapoTranspiration Potentielle
FNSEA : Fédération Nationale des Syndicats d'Exploitants Agricoles
GPS : Global Positioning System
GIS Sol : Groupement d'intérêt scientifique pour les Sols
HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
Hg : Mercure
IAA : Industrie AgroAlimentaire
IGN : Institut National de l'Information Géographique et forestière
INERIS : Institut National de l'Environnement industriel et des Risques

INPN : Institut National du Patrimoine National
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
IRD : Institut de Recherche pour le Développement
ISDND : Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux
KNAPPE : Knowledge and need assessment on pharmaceutical product in environmental waters
LAS : Linear AlkylBenzène Sulfonate
MB : Matière brute
MFSC : Matière Fertilisante et Support de Culture
MS : Matière sèche
MO : Matière Organique
Ni : Nickel
NPP : Nombre le Plus Probable
NPPUC : Nombre le Plus Probable d'Unités Cytoplasmiques
NTK : Nitrogen Total Kjeldahl (Azote total Kjeldahl)
P : Précipitation
PAC : Politique Agricole Commune
PAN : Programme d'actions National
PAR : Programme d'Actions Régional
Pb : Plomb
PBDE : polybromodiphényléthers
PCB : PolyChloroBiphényle
PCDD : PolyChloroDibenzo-p-Dioxine
PCDF : PolyChloroDibenzo-p-Furane
PdEDMA : Plan Départemental d'Élimination des Déchets Ménagers et Assimilés
pH : Potentiel Hydrogène
PNSE : Plan National Santé Environnement
PPE : Programme Prévisionnel d'Épandage
PRO : Produit résiduaire Organique
SAE : Suivi et Auto-surveillance des Épandages
SAGE : Schéma d'Aménagement de la Gestion de l'Eau
SATESE : Service d'Assistance Technique et d'Étude aux Stations d'Épuration
SIAAP : Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne
SNFS : Syndicat national des fabricants de sucre
SOGREAH : SOciété GRenobloise d'Études et d'Applications Hydrauliques
STEP : STation d'EPuration
SYPREA : Syndicat des Professionnels du Recyclage en Agriculture
UE : Union Européenne
UMR : Unité Mixte de Recherche
ZICO : Zone Importante pour la Conservation des Oiseaux
Zn : Zinc
ZNIEFF : Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique Floristique et Faunistique
ZPAAC : Zone de Protection de l'Aire d'Alimentation de Captage

1 Préambule

Le présent document a pour objet de répondre aux observations déposées par le public et la commission d'enquête au cours de l'enquête publique relative à la demande présentée par le Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP), concernant la demande d'autorisation d'épandage des boues de Seine aval dans le département de l'Eure-et-Loir.

Les observations relatives à l'enquête publique ont été communiquées au SIAAP par le Président de la commission d'enquête, lors de la remise du procès-verbal, le 4 novembre 2019.

Afin de faciliter l'exploitation de ce mémoire, les remarques sont regroupées par thèmes. Cette présentation doit permettre d'éviter les répétitions, tout en restant exhaustif. Des réponses spécifiques aux questions de la commission d'enquête ont été apportées.

La phase de communication avant le démarrage de l'enquête est également présentée dans ce document.

2 Introduction

Le département de l'Eure-et-Loir est autorisé à valoriser les boues thermiques de Seine aval par les arrêtés préfectoraux du 11 juin 2004, modifiés le 14 janvier 2014, et du 28 mai 2010. Ces arrêtés sont arrivés respectivement à échéance le 11 juin 2019 et le 28 mai 2019, un dossier a été déposé aux services de la Direction Départementale des Territoires (DDT) le 23 mai 2017 pour renouveler ces autorisations et intégrer de nouvelles surfaces dans le cadre d'une mise à jour au seuil de modification (conformément à la circulaire du 18/04/2005 et à la doctrine de la DDT sur son interprétation).

L'instruction de la demande d'examen au cas par cas, par la Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DREAL), de la Région Centre-Val-de-Loire, a statué le 25 juillet 2017 sur la nécessité de réaliser une étude d'impact. Suite à cet avis et au courrier de la DDT, en date du 13 novembre 2017, le dossier a fait l'objet d'une demande d'autorisation environnementale unique avec évaluation environnementale, déposée le 6 juin 2018. Un arrêté de prorogation des autorisations en date du 27 mars 2019 et valable uniquement pour la campagne d'épandage 2019 a permis au SIAAP de valoriser ces boues dans le département de l'Eure-et-Loir en 2019.

L'évolution des pratiques raisonnées de fertilisation, suite à la réévaluation à la hausse de la disponibilité pour les cultures du phosphore présent dans les boues, a conduit à une diminution régulière de la dose d'apport des boues au cours des 10 dernières années.

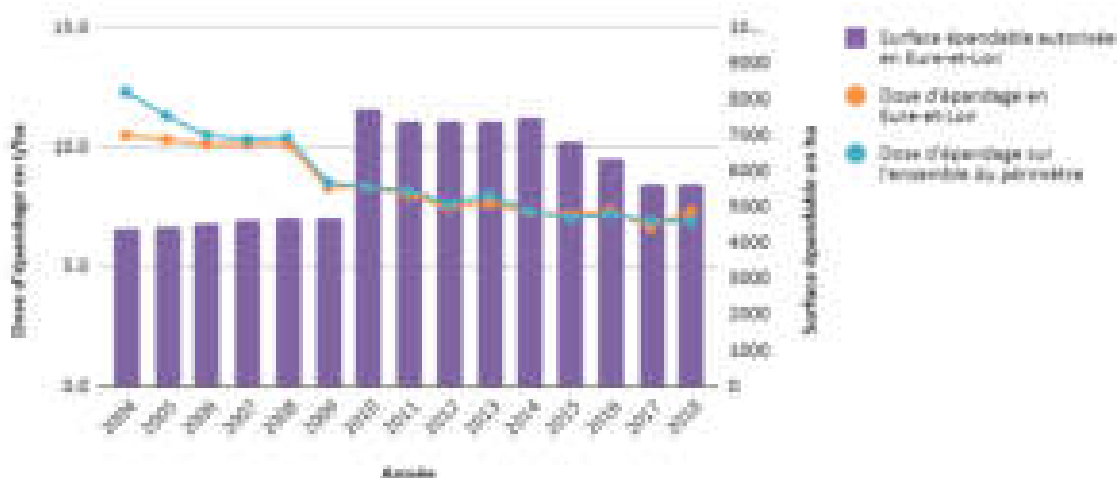


Figure 1: Evolution de la dose d'épandage et du périmètre d'épandage des boues de Seine aval en Eure-et-Loir

De plus, Le périmètre d'épandage des boues de Seine aval en Eure-et-Loir a perdu environ 1 900 ha depuis 2014 suite à des désistements d'exploitation agricoles pour cause de changement de pratique culturale, de cession d'exploitation, d'intégration sur un autre plan d'épandage...

De ce fait, le SIAAP présente dans le cadre d'une nouvelle procédure d'autorisation environnementale, dans le département de l'Eure-et-Loir, le renouvellement des parcelles de son périmètre d'épandage actuel (parcelles déjà autorisées par les arrêtés du 11/06/2004, du 14/01/2014 et du 28/05/2010) et l'ajout de nouvelles parcelles. Cette procédure permettra de compenser la perte de potentiel d'épandage engendrée par l'évolution des pratiques et du périmètre d'épandage (désistement d'exploitations).

Le nouveau périmètre d'épandage des boues de Seine aval dans le département de l'Eure-et-Loir concerne une surface de 6 694,02 ha, dont 6 439,17 ha épandables. Les parcelles se situent sur 75 communes, et sont exploitées par 55 exploitations agricoles.

Le dossier a été jugé recevable par la DDT le 3 juin 2019 et fait l'objet de l'avis des services compétents (DREAL, ARS¹, CLE² des SAGE³,...), ce dossier a fait l'objet d'une enquête publique, afin d'informer le public et de recueillir ses appréciations et suggestions.

Cette enquête s'est déroulée du 23 septembre au 25 octobre 2019.

Certains éléments de réponse aux interrogations soulevées lors de l'enquête publique sont développés dans le dossier d'autorisation ; ils seront rappelés et complétés dans le cadre de ce mémoire en réponse.

¹ ARS : Agence régionale de Santé

² CLE : Commission Locale de l'Eau

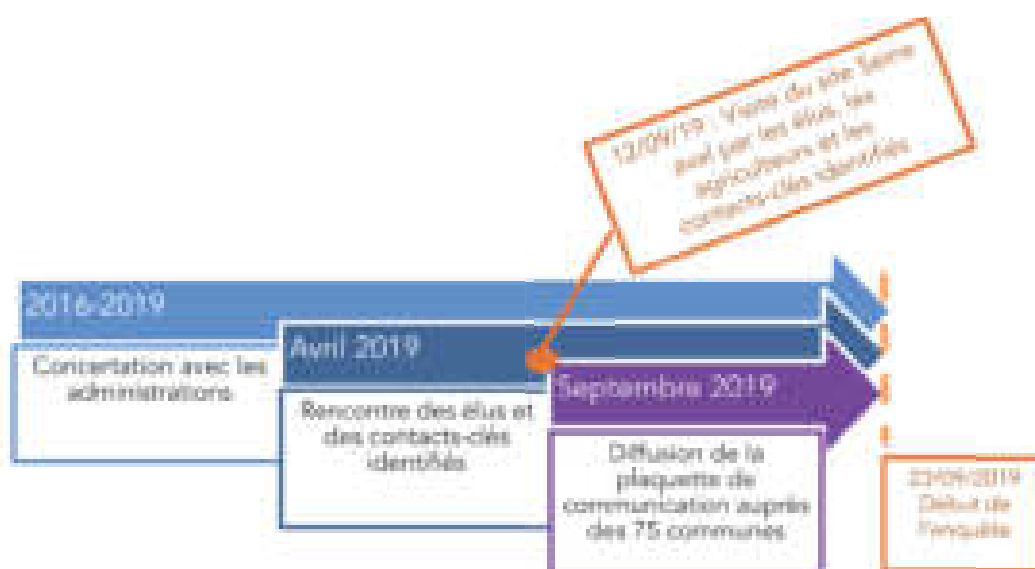
³ SAGE : Schéma d'Aménagement de la Gestion de l'Eau

3 Bilan de la phase de communication

Dans le cadre de la procédure de nouvelle autorisation d'épandage des boues de Seine aval dans le département de l'Eure-et-Loir, une démarche de communication a été mise en œuvre par le SIAAP :

- avec les administrations départementales, dès 2016, pour préciser les attentes de chaque partie et définir les modalités de la procédure,
- avec les maires des communes concernées et les contacts-clés identifiés (associations, conseillers départementaux...), afin d'informer sur le projet et de faire remonter les observations éventuelles. Ces rencontres ont débuté fin avril 2019, dès que le périmètre d'épandage a été finalisé, et se sont poursuivies jusqu'au 20 septembre 2019.

Cette démarche de concertation préalable a obtenu un accord de principe des services de la DDT. Elle est résumée dans le schéma suivant.



3.1 Bilan de la concertation préalable avec les administrations départementales

Le tableau suivant présente les principales démarches menées auprès des administrations dans le cadre de la démarche préalable au projet et du suivi de la procédure.

Tableau 1: Bilan de la concertation avec les administrations

Date	Organismes	Objet	Commentaires
04/04/2016	DDT, SIAAP, SEDE	Réunion de concertation	La procédure de renouvellement fera l'objet d'un dossier unique fusionnant les 2 périmètres (2004 et 2010). <i>Accord de principe pour un ajout de surface en dessous du seuil de révision défini par la circulaire du 18/04/2005 et uniquement sur des communes autorisées</i>
24/05/2017	SIAAP	Dépôt dossier	Dépôt officiel du dossier de demande de renouvellement de l'autorisation d'épandage.
14/06/2017	SIAAP	Envoi dossier à la DREAL ⁴	Envoi de la demande d'examen cas par cas préalable à la réalisation d'une évaluation environnementale.
16/06/2017	DDT	Demande de complément	Demande de complément sur le dossier de renouvellement
25/07/2017	Ae ⁵	Décision	Décision portant obligation de réaliser une étude d'impact.
08/11/2017	SIAAP	Complément et étude d'impact	Réponse à la demande de complément de la DDT et dépôt de l'étude d'impact
13/11/2017	DDT	Demande nouveau dossier	Demande de dépôt d'un dossier d'autorisation environnemental unique suite à la décision de l'Autorité Environnementale
08/01/2018	DDT	Arrêté préfectoral	Arrêté de prorogation des autorisations jusqu'au 8 juillet 2019
29/01/2018	DDT	Demande de complément	Demande de complément sur l'étude d'impact et le raisonnement de la dose
06/06/2018	SIAAP	Dépôt dossier	Dépôt du dossier de demande d'autorisation
04/07/2018	DDT, chambre d'agriculture, SIAAP, SEDE	Réunion de concertation	Validation du raisonnement de la dose prévision d'un nouvel arrêté de prorogation
06/07/2018	DDT	Demande de complément	Demande de complément sur le nouveau dossier
28/11/2018	SIAAP	Complément	Réponse à la demande de complément
01/02/2019	DDT, SIAAP, SEDE	Réunion de concertation	Échanges sur la procédure, Échanges sur le plan de communication Échanges sur l'organisation de l'enquête publique
05/02/2019	DDT	Demande de complément	Demande de complément suite au remembrement sur 3 communes
25/02/2019	DDT, MR Ae ⁶ , SIAAP, SEDE	Avis	Avis de la MR Ae sur l'Etude d'impact
27/03/2019	DDT	Arrêté préfectoral	Arrêté de prorogation des autorisations d'épandage pour la campagne d'épandage 2019
09/04/2019	SIAAP	complément	Réponse à la demande de complément
03/06/2019	DDT	Recevabilité	Dossier d'autorisation jugé recevable par la DDT
19/06/2019	SIAAP	Réponse avis de l'Ae	Réponse à l'avis de l'Ae sur l'étude d'impact

⁴ DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

⁵ Ae : Autorité environnementale

⁶ Mission régionale d'autorité environnementale

Date	Organismes	Objet	Commentaires
21/06/2019	Tribunal Administratif	Décision	<i>Désignation de la Commission d'Enquête (CE)</i>
11/07/2019	DDT	Arrêté préfectoral	<i>Arrêté d'ouverture de l'enquête publique</i>
03/09/2019	Tribunal Administratif	Décision	<i>Remplacement du président de la commission d'enquête</i>

L'ensemble des rencontres réalisées a fait l'objet de comptes-rendus qui ont été transmis pour la plupart aux participants avant l'enquête publique. Les derniers comptes-rendus seront transmis au cours du mois de novembre 2019. Des échanges par téléphone ou mail ont également eu lieu tout au long de la procédure avec la DDT de l'Eure-et-Loir, afin de suivre l'avancée de la procédure.

3.2 Bilan des rencontres des communes concernées par le périmètre d'épandage des boues de Seine aval

Une proposition de rencontre a été adressée, par mail et par téléphone, à chacune des 75 communes concernées par le projet d'autorisation d'épandage des boues de Seine aval dans le département de l'Eure-et-Loir. Suite à ces démarches, 42 des 75 communes ont été rencontrées, entre avril 2019 et le 23 septembre 2019 avant le début de l'enquête publique. Ces rencontres ont permis d'informer les communes du projet et de répondre à leurs éventuelles attentes ou interrogations. Les communes rencontrées sont listées dans le tableau suivant.

Tableau 2: Bilan des rencontres avec les mairies concernées par le projet

Commune	Maire	Date de la rencontre
ALLAINVILLE	Monsieur Alain CAPERAN	28/06/2019
AUNAY-SOUS-CRÉCY	Monsieur Jacques RIVIÈRE	11/06/2019
BAILLEAU-ARMENONVILLE	Monsieur Gérald GARNIER	10/07/2019
BAILLEAU-L'ÉVÊQUE	Monsieur Philippe BARAZZUTTI	24/05/2019
BERCHÈRES-SAINT-GERMAIN	Monsieur Dominique BLOIS	17/09/2019
BÉVILLE-LE-COMTE	Monsieur Eric SEGARD	13/09/2019
BOISSY-EN-DROUAIS	Monsieur Michel ETIENNE-AUGUSTIN	27/06/2019
BOISSY-LÈS-PERCHE	Monsieur Christophe LEFÉBURE	04/07/2019
BREZOLLES	Monsieur Loïc BARBIER	09/07/2019
BÛ	Monsieur Pierre SANIER	26/06/2019
CHALLET	Madame Hélène DENIEAULT	31/07/2019
CHARPONT	Madame Dominique DE VOS	25/06/2019
CLÉVILLIERS	Monsieur Alain BELLAMY	08/08/2019
COLTAINVILLE	Monsieur Philippe GALIOTTO	06/08/2019
CRÉCY-COUVÉ	Monsieur Didier ARNOULT	06/06/2019
CRUCEY-VILLAGES	Monsieur Jean-Paul AMELOT	27/06/2019
DAMMARIE	Madame Annick LHERMITTE	10/07/2019
ÉCLUZELLES	Madame Christine RENAUX-MARECHAL	26/06/2019
ÉPEAUTROLLES	Monsieur Bruno TARANNE	15/07/2019

Commune	Maire	Date de la rencontre
FAVIÈRES	Monsieur Jean-Luc SCHREIBER	24/07/2019
FESSANVILLIERS-MATTANVILLIERS	Monsieur Jean-Luc BOISNARD	21/08/2019
FRANCOURVILLE	Monsieur Eric MOULIN	26/08/2019
GARANCIÈRES-EN-DROUAIS	Monsieur Guy LAVIE	13/06/2019
GASVILLE-OISÈME	Monsieur William BELHOMME	27/06/2019
LA BOURDINIÈRE-SAINT-LOUP	Monsieur Marc LECOEUR	28/06/2019
LE BOULLAY-LES-DEUX-ÉGLISES	Monsieur Bernard JONNIER	09/07/2019
LE BOULLAY-MIVOYE	Monsieur Stéphane HUET	19/07/2019
LE BOULLAY-THIERRY	Monsieur Frédéric GIROUX	31/07/2019
LES CHÂTELLIERS-NOTRE-DAME	Monsieur Pierre GIGOU	11/06/2019
LURAY	Monsieur Alain FILLON	06/06/2019
MARCHÉVILLE	Monsieur Dominique CAPEL	26/07/2019
MIGNIÈRES	Monsieur Didier GARNIER	18/09/2019
MITTAINVILLIERS-VÉRIGNY	Monsieur Mickael TACHAT	06/08/2019
MOINVILLE-LA-JEULIN	Monsieur Jean-Jacques RAUX	17/07/2019
NÉRON	Madame Geneviève LE NEVÉ	13/09/2019
NOGENT-LE-PHAYE	Madame Brigitte FRANCHET	16/07/2019
NONVILLIERS-GRANDHOUX	Monsieur Claude-Michel POULAIN	22/07/2019
PRUNAY-LE-GILLON	Monsieur Jackie FERRÉ	24/07/2019
TREMBLAY-LES-VILLAGES	Madame Christelle MINARD	17/09/2019
TRÉON	Monsieur Christian BERTHELIER	20/06/2019
VERT-EN-DROUAIS	Madame Evelyne DELAPLACE	19/07/2019
VILLEMEUX-SUR-EURE	Monsieur Daniel RIGOURD	20/05/2019

Chaque rendez-vous a fait l'objet d'un compte-rendu, transmis à chaque mairie concernée. Les mairies non rencontrées ont fait l'objet de plusieurs relances soit par téléphone soit par messagerie entre juillet et août 2019.

Les principaux thèmes abordés lors de ces rencontres sont exposés dans le graphique suivant. Aucun nouveau thème n'a émergé par rapport aux précédentes enquêtes publiques concernant les épandages de boues de Seine aval, ayant eu lieu en 2011-2012 (Val d'Oise), 2013 (Somme) et 2016 (Aisne), 2018 (Seine-et-Marne). Les problématiques soulevées en Eure-et-Loir sont similaires.

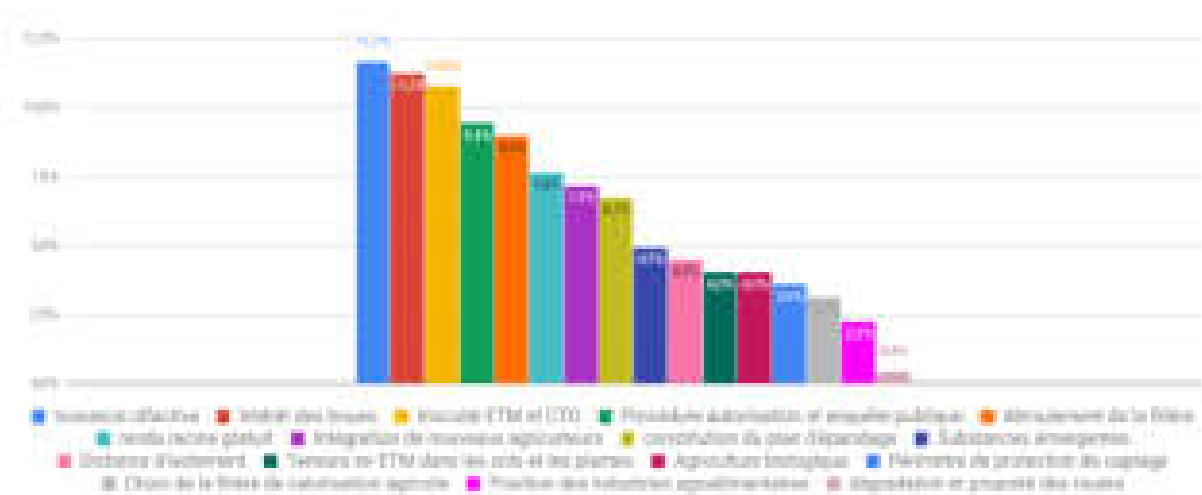


Figure 2: Principaux thèmes abordés lors des rencontres avec les mairies

3.3 Bilan des rencontres des contacts-clés du département de l'Eure-et-Loir

Le tableau suivant détaille les 7 rencontres avec les contacts clés du département, qui ont eu lieu en amont de l'enquête publique.

Tableau 3: Bilan des rencontres avec les contacts-clés concernés par le projet

Type	Date de la rencontre	Structure	Interlocuteurs	Fonction
Association	10/09/2019	Eure-et-Loir Nature	Dominique HENRY	Vice-présidente
			Vincent CHAILLOU	Membre
			Anne LELONG	Administratrice
			Nathalie REPELLIN	Commission du patrimoine
			Didier PEYRONNET	DIP pour l'association
			Michel BOIN	Membre et botaniste
Conseil départemental / mairie	17/09/2019	Canton de Saint-Lubin-des-Joncherets	Christelle MINARD	Conseillère départementale et maire de Tremblay-les-Villages
			Thibault PELLETIER	Maire adjoint de Tremblay-les-Villages

Les principaux thèmes abordés au cours de ces rendez-vous sont exposés sur la figure suivante.

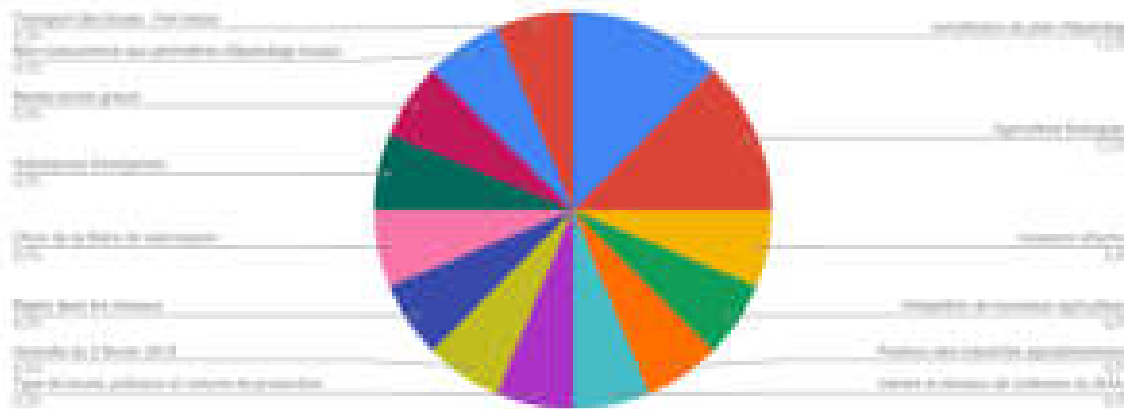


Figure 3: Principaux thèmes abordés lors des rencontres avec les contacts-clés

Aucune opposition, de nature à remettre en cause le projet d'autorisation d'épandage, n'a été ressentie à la suite de ces différentes rencontres. Chaque rendez-vous a fait l'objet d'un compte-rendu, transmis aux personnes concernées avant ou après la période d'enquête publique.

3.4 Bilan de la communication avec les communes et les contacts-clés

Le bilan de la démarche entreprise auprès des communes et des contacts-clés identifiés est présenté dans le tableau suivant : 100% des communes concernées par le projet d'autorisation d'épandage, et 100% des contacts-clés identifiés dans le département ont été informés de la procédure. Parmi ces interlocuteurs, 34% ont été rencontrés ou ont demandé des informations complémentaires sur le projet.

Tableau 4: Bilan de la phase de communication

Intervenant	Contacts identifiés	Information procédure mail / courrier	Demande de renseignements	Rencontres réalisées	% rencontres
Mairie	75	75	1	42	56,0%
Sénateurs	3	3		0	0,0%
Députés	4	4		0	0,0%
Conseillers régionaux	14	14		0	0,0%
Conseillers départementaux	19	19		1	5,3%
Associations	6	6		1	16,7%
Structure gestionnaire des captages prioritaires	6	6		0	0,0%
SAGE	3	3		0	0,0%
TOTAL	130	130	1	44	33,8%

3.5 Visite de l'usine Seine aval

Une visite du site Seine aval a été organisée le 12 septembre 2019, pour les 75 maires concernés par le périmètre d'épandage, les contacts-clés identifiés, les agriculteurs partenaires de la filière Seine aval dans le département de l'Eure-et-Loir, et les administrations (DDT de l'Eure-et-Loir).

Des invitations ont été envoyées par courrier le 7 août 2019. Deux bus ont été prévus pour acheminer les participants sur site depuis 2 points différents en Eure-et-Loir (Mainvilliers et Tremblay-les-Villages).

Le tableau suivant présente les personnes qui ont participé à la visite de site du 12 septembre 2019, représentant plusieurs structures.

Tableau 5: Participants à la visite du site Seine aval

Structure	Présent
Administration	un élu de la chambre d'agriculture 28
Exploitation agricole / ETA ⁷	trois agriculteurs ou ETA
Association	deux représentants d'Eure-et-Loir Nature
Commune	quatre représentants de 3 communes
Conseillers départementaux	une conseillère départementale
Sénateurs	une sénatrice
Syndicat des eaux	une représentante de Eau de Paris

Les principaux points abordés au cours de la visite ont été les suivants :

- le fonctionnement de l'usine Seine aval (process, installation, caractéristiques des eaux usées etc.) ;
- les rejets dans les réseaux;
- l'innocuité des boues (ETM⁸, CTO⁹, substances émergentes; etc.);
- le choix de la filière de valorisation des boues, l'agriculture biologique, le rendu-racine gratuit, le transport des boues, la position des industries agroalimentaires;
- la constitution du périmètre d'épandage, les zones naturelles, les captages.

3.6 Plaquette de communication

La plaquette « Valorisation des boues de Seine aval en Eure-et-Loir » a été réalisée, afin de compléter l'information du public sur ce dossier, et d'en rendre sa compréhension plus aisée. Elle présente les caractéristiques des boues de Seine aval, la filière de valorisation agricole, ainsi que le périmètre d'épandage concerné par la nouvelle autorisation dans le département de l'Eure-et-Loir.

Cette plaquette a été envoyée aux 75 mairies concernées par le projet le 6 septembre 2019. Elle est disponible en annexe 1.

⁷ Entreprise de Travaux Agricoles

⁸ Eléments-traces métalliques

⁹ Composés-traces organiques

3.7 Conclusion

La phase de communication mise en œuvre par le SIAAP, dans le cadre de la procédure d'autorisation d'épandage des boues de Seine aval, s'est déclinée de la manière suivante :

- consultation des administrations et concertation en amont de la procédure et tout au long de l'instruction,
- information et proposition de rencontres aux maires des communes concernées par le projet et aux contacts-clés identifiés dans le département,
- organisation d'une visite sur le site Seine aval,
- réalisation d'une plaquette de communication sur le projet.

Au 23 septembre 2019, date du début de l'enquête publique, 100 % des contacts identifiés ont été informés de la procédure, et 35 % ont été rencontrés ou ont reçu des compléments sur le dossier.

Suite à cette démarche, aucun frein majeur n'a été identifié concernant la procédure d'autorisation d'épandage des boues de Seine aval dans le département de l'Eure-et-Loir.

4 Observations et thèmes abordés

Les documents suivants ont été envoyés dans les 68 mairies (sans permanence) concernées par le projet, par le prestataire du SIAAP, le 19 août 2019 :

- courrier de la Préfecture précisant les modalités de l'enquête publique,
- arrêté d'ouverture d'enquête publique,
- avis d'enquête publique à afficher à l'extérieur de la mairie,
- registre d'enquête publique pour les communes de permanence de l'enquête publique,
- dossier de demande d'autorisation : complet sous format informatique, et simplifié (Résumé non technique, présentation générale et extrait du dossier cartographique de la commune concernée) sous format papier.

Le dossier complet sous format papier et informatique a été déposé en main propre par la DDT aux 7 communes de permanence.

Le prestataire du SIAAP s'est assuré dans chaque commune, en amont de l'enquête publique, du respect des consignes d'affiche de l'avis d'enquête publique à l'extérieur de la mairie.

21 permanences ont eu lieu durant l'enquête publique, dans 7 mairies :

- le 30 septembre, les 7 et 22 octobre 2019 au Boullay-Mivoye,
- le 30 septembre, les 7 et 22 octobre 2019 à Brezolles,
- le 23 septembre, les 9 et 25 octobre 2019 à Dammarie,
- les 23 septembre, les 9 et 25 octobre 2019 à Mainvilliers (siège de l'enquête),
- le 27 septembre, les 18 et 21 octobre 2019 à Nonvilliers-Grandhoux,
- le 27 septembre, les 15 et 18 octobre 2019 à Prunay-le-Gillon,
- les 1, 14 et 21 octobre 2019 à Serazereux.

Les registres papiers ont été envoyés à la commission d'enquête. L'ensemble des observations et des avis recueillis ont été transmis au SIAAP par PubliLégal et par le Président de la commission d'enquête.

L'examen des registres papiers et dématérialisé a permis de constater 72 observations :

- 30 observations sur les registres papiers dont 11 lettres reçues au siège d'enquête,
- 39 observations sur le registre dématérialisé,
- 3 observations sur l'adresse mail de la préfecture.

Le tableau suivant présente le bilan des observations relevées dans les registres sur le projet.

Tableau 6: Synthèse des observations recueillies, selon les thèmes retenus, lors de l'enquête publique

	Brezolles	Dammarie	Le Boullay- Mivoye	Mainvilliers	Nonvilliers- Grandhoux	Prunay- le- Gillon	Serazereux	Registre dématérialisé	Préfecture	TOTAL
Le refus des boues venues de l'extérieur			2	2	1		1	20		26
L'acceptation des boues avec des réserves				1			1	2		4
La composition des boues et leur toxicité	1		3	3				7	1	15
Le recul d'expérience et le principe de précaution			1					6		7
Les atteintes à la santé	1		1					3		5
Les principales nuisances constatées			2				2	6		10
Les incidents sur la station d'Achères et le devenir des boues			1	1			2	1		5
Les filières alternatives à l'épandage des boues			1					6		7
Le refus de certains cahiers des charges, la réglementation européenne et sa pérennité							1	2	1	4
L'aptitude de certains sols			2	1	1			2	1	7
L'exécution de la filière d'épandage				1						1
L'information du public et des élus								5		5
Questions diverses			2	1			2	1		6

4.1 Thème 1 : Le refus des boues venues de l'extérieur

Les éléments ci-après permettent de compléter le dossier de demande d'autorisation afin de répondre à certaines observations formulées au cours de l'enquête.

Les observations reprises dans le thème 1 : "Le refus des boues venues de l'extérieur" par la commission d'enquête évoquent différents sujets comme :

- Le refus des boues venues de l'Île de France
- La qualité du cadre de vie
- La mise en place des ZNT¹⁰
- Le risque lié à la présence de substances indésirables

4.1.1 Pratiques agricoles

L'épandage des boues de Seine aval est une pratique agricole qui s'intègre à l'itinéraire cultural d'une parcelle, au même titre que l'épandage d'engrais, d'amendements organiques ou calciques (effluents d'élevage, cendres, écumes de sucrerie, ...) et autres pratiques de fertilisation. C'est une pratique courante réalisée au moyen de tracteurs auxquels sont attelés des épandeurs adaptés, permettant une bonne répartition au sol des boues.

De plus, l'épandage s'inscrit dans la fertilisation raisonnée des exploitations car il vise à substituer aux engrais chimiques habituellement épandus, des engrais d'origine organique. Les engrais chimiques viennent entre autre pour le phosphore du Maroc, de Chine, d'Afrique du sud etc. L'utilisation des boues de station d'épuration favorise ainsi un circuit plus court.

La matière organique présente dans les boues de Seine aval apporte de nombreux avantages pour les sols :

- Maintien d'une bonne structure des sols : lutte contre l'érosion, contre le phénomène de battance,...
- Meilleure rétention en eau des sols.
- Activation de la vie biologique des sols.

Tous ces critères facilitent l'implantation des cultures et participent à l'obtention de rendements satisfaisants.

L'épandage de boues de Seine aval permet d'entretenir les propriétés physiques du sol et de réduire la consommation en fertilisants chimiques classiques. Aussi, le recyclage agricole des boues de stations d'épuration est considéré comme une Bonne Pratique Agricole (BPA), et l'utilisation des boues est reconnue comme faisant partie intégrante de l'agriculture raisonnée (décret n°2002-631 du 25 avril 2002).

Aujourd'hui, la valeur fertilisante des boues est établie. Et le risque au regard des éléments indésirables est maîtrisé.

4.1.2 La définition des ZNT

La Zone Non Traitée (ZNT) est une distance à respecter vis-à-vis des points d'eau lors de la pulvérisation. C'est une mention réglementaire qui accompagne l'Autorisation de Mise sur le Marché (AMM) : elle est spécifique au produit, à son usage (=culture et parasite cible) et doit figurer sur l'étiquette.

Elle concerne donc uniquement des distances d'isolement à appliquer par rapport au point d'eau pour la pulvérisation de produits phytosanitaires.

¹⁰ Zones Non Traitées

Les distances d'isolement applicables au boues de station d'épuration par rapport aux points d'eau et plan d'eau sont prescrites dans l'arrêté du 8 janvier 1998 ainsi que les différents programmes d'action mis en place dans les zones vulnérables à la pollution aux nitrates d'origine agricoles. (cf. chapitre 4.3.9. *Protection de la ressource en eau*)

4.1.3 Mutualisation des déchets

Au cours de l'enquête publique, plusieurs riverains font part de leur opposition à l'épandage de boues qui viennent d'un autre territoire. Les boues ne sont pas les seuls déchets à être traités sur un territoire communal ou départemental, il y a aussi les ordures ménagères, les plastiques, le verre, les papiers, les déchets verts, les déchets du BTP, les « périmés » pharmaceutiques, les vieux meubles, les piles ou batteries, les vieux électroménagers, etc.

Le Programme Départemental d'Élimination des Déchets Ménagers et Assimilés (PDEDMA) d'Eure-et-Loir approuvé en avril 2011 et actuellement en vigueur prend en compte la mutualisation du traitement des déchets et a pour objectif l'amélioration de la valorisation de la matière organique. Il préconise également de retenir les boues solides pour le recyclage agricole.

De plus, certaines communes très urbanisées ne disposent pas des surfaces nécessaires pour valoriser les boues issues du traitement de leurs eaux usées.

4.1.4 Non concurrence aux boues locales

En raison de l'existence de systèmes d'assainissement collectif dans certaines collectivités, celles-ci souhaitent épandre les boues produites par leur station d'épuration sur leur territoire agricole.

Le SIAAP s'engage à ne pas concurrencer les boues locales.

Lors de l'élaboration du dossier, il est explicitement demandé aux agriculteurs de ne pas intégrer au projet les parcelles de leur exploitation faisant déjà partie d'un plan d'épandage local.

Pendant la durée de l'autorisation, les agriculteurs souhaitant intégrer un plan d'épandage local peuvent retirer tout ou partie de leur parcellaire du périmètre d'épandage des boues de Seine aval sur simple demande écrite auprès du SIAAP et transmise pour information à l'administration. Les parcelles concernées sont alors désistées du périmètre de Seine aval.

Pendant la durée de l'autorisation, si une nouvelle station d'épuration est créée et que la collectivité ne trouve pas suffisamment de parcelles pour valoriser les boues produites, une procédure de médiation peut être entamée. Le SIAAP demande alors aux agriculteurs appartenant au plan d'épandage des boues de Seine aval de bien vouloir mettre à disposition les parcelles les plus adaptées pour l'épandage des boues locales. Ces parcelles sont alors désistées du périmètre autorisé pour l'épandage de Seine aval.

La demande d'autorisation d'épandage pour les boues de Seine aval en Eure-et-Loir porte sur environ 1,4 % de la SAU¹¹ départementale.

4.1.5 Risques sanitaires et environnementaux

Les risques sanitaires et environnementaux liés à la présence des boues sont présentés dans les thèmes 3 et 5.

¹¹ Surface Agricole Utile

4.2 Thème 2 : L'acceptation des boues avec des réserves

Les éléments ci-après permettent de compléter le dossier de demande d'autorisation afin de répondre à certaines observations formulées pendant l'enquête.

Les observations reprises dans le thème 2 : "l'acceptation des boues avec des réserves" par la commission d'enquête évoquent différents sujets comme :

- Les nuisances olfactives
- L'impact des épandages sur les zones naturelles type ZNIEFF¹² et ZPS¹³

4.2.1 Les mesures prises pour diminuer les odeurs

Le SIAAP prend des mesures pour limiter les nuisances olfactives liées à la filière d'épandage de ces boues en Eure-et-Loir comme :

- la livraison des boues à plus de 100m des habitations
- l'absence d'épandage les week-end et jours fériés
- l'absence d'épandage par fort vent
- L'enfouissement des boues dans les 48h à moins de 100m des habitations.

Les nuisances liées aux épandages des boues de Seine aval en Eure-et-Loir est plus largement développé dans le chapitre 4.6 *Thème 6 : les principales nuisances constatées.*

4.2.2 Compatibilité avec les zones naturelles

Lors de l'élaboration du dossier de demande d'autorisation, les zones naturelles remarquables ont été répertoriées, d'après les données disponibles auprès de la DREAL et de l'Inventaire National du Patrimoine Naturel (INPN), en septembre 2018. Elles figurent dans le document d'étude d'impact du dossier de demande d'autorisation.

Les parcelles du projet d'autorisation sont situées :

- dans 2 ZNIEFF¹⁴ de type 2,
- dans 2 ZICO¹⁵ de type 2,
- dans 2 Natura 2000 de type ZPS
- à moins de 10 km de Natura 2000 de type ZIC et 3 de type ZSC
- à moins de 10 km d'une Réserve Naturelle Régionale

Ces zones ne confèrent aux sites concernés aucune prescription réglementaire par rapport aux activités agricoles, dont fait partie la valorisation des boues d'épuration par épandage. En revanche, il est recommandé une attention particulière à ces zones lors de l'élaboration de projets d'aménagement ou de gestion.

Les épandages de boues d'épuration se font sur des parcelles agricoles cultivées. Les cultures qui y sont semées, et les adventices qui peuvent apparaître, ne font pas partie des espèces remarquables recensées au sein de ces zones écologiques.

¹² Zone Naturelle d'Intérêt Faunistique et Floristique

¹³ Zone de Protection Spéciale

¹⁴ Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique Floristique et Faunistique

¹⁵ Zone Importante pour la Conservation des Oiseaux

Par ailleurs, le respect des dispositions réglementaires pour la protection des ressources en eau garantit l'innocuité des épandages de boues d'épuration pour la faune aquatique présente dans ces zones écologiques.

Se substituant à la fertilisation chimique, les épandages de boues d'épuration n'impliquent aucun bouleversement néfaste aux conditions de vie de la faune terrestre. Ils participent au contraire à de meilleures conditions de développement de la faune du sol (vie microbienne, vers de terre, ...).

La valorisation agricole des boues d'épuration sur les parcelles agricoles situées dans ces zones d'intérêts écologiques remarquables est compatible avec leur classement car cette pratique s'intègre aux travaux agricoles courants. De plus, le respect des pratiques d'épandage (pas d'épandage sur prairie ni sur jachère) et des dispositions pour la protection des eaux permettent de garantir l'absence d'impact négatif sur la biodiversité aquatique et terrestre.

4.3 Thème 3 : La composition des boues et leur toxicité

Les éléments ci-après permettent de compléter le dossier de demande d'autorisation afin de répondre à certaines observations formulées au cours de l'enquête publique.

Les observations reprises dans le thème 3 : "La composition des boues et leur toxicité" par la commission d'enquête évoquent différents sujets comme :

- La composition des boues
- Le risque lié à la présence d'éléments-traces métalliques dans les boues
- Le risque lié à la présence de résidus médicamenteux, pesticide, hormones, nitrates...
- L'impact des épandages sur la ressources en eaux, les sols, la faune et la flore
- Le risque lié à la présence d'agents pathogènes
- Le contrôle de la filière

4.3.1 La composition des boues de Seine aval

4.3.1.1 Origine des boues de Seine aval

Les eaux usées qui entrent sur le Site de Seine aval ont différentes origines :

- 81 % d'origine domestique : ce sont les eaux qui proviennent des activités domestiques telles que les eaux fécales, de nettoyage, de cuisine, d'hygiène, etc... Elles sont composées principalement de composés organiques, particules en suspension et substances nutritives (phosphore, azote).
- 10 % d'origine industrielle : ce sont les eaux utilisées par les industries pour le fonctionnement des installations techniques ou directement pour la fabrication des produits. La composition des eaux industrielles est directement fonction du type d'industries dont elles proviennent. Leur rejet dans le réseau doit faire l'objet d'une autorisation du SIAAP, tenant compte de la composition des effluents.

Le SIAAP définit pour chaque industriel des critères à respecter pour le rejet des effluents industriels dans le réseau. Ces critères prennent en compte la charge rejetée par chaque établissement, notamment en ETM, PCB¹⁶, et autres micropolluants : ils permettent de maîtriser la composition des boues en sortie de traitement, et leur conformité à l'arrêté du 8 janvier 1998.

Le SIAAP, conjointement aux services départementaux, a mis en place une procédure d'édification des arrêtés d'autorisation de déversements, suivis, lorsque cela est nécessaire, d'une convention de déversement. Au total, le nombre d'arrêtés d'autorisation de déversement délivrés et recensés sur la zone SIAAP au 31 décembre 2018 est de 1 479 , répartis sur les 8 départements du 75, 77, 78, 91, 92, 93, 94, 95. Ces arrêtés d'autorisation concernent les industries mais également tout type d'entreprise qui rejette des eaux non domestiques.

- 9 % d'origine pluviale : ce sont les eaux météorologiques qui, après ruissellement, s'infiltrent dans les sols ou sont collectées par le réseau de collecte des eaux usées.

¹⁶ PolyChloroBiphényle

4.3.1.2 Composition des boues de Seine aval

Pour les boues d'épuration urbaines, les questions soulevées au cours de cette enquête publique, ont porté principalement vers les éléments traces-métalliques (ETM), les composés traces organiques (CTO), les résidus médicamenteux et les pesticides.

Les micropolluants regroupent l'ensemble des molécules synthétiques ou naturelles, diffusées dans l'environnement par les activités humaines et focalisant depuis quelques années l'attention de la communauté scientifique et de l'opinion publique au regard de leurs éventuels impacts sanitaires et environnementaux.

Les boues de Seine aval sont analysées chaque semaine, afin de contrôler leur conformité réglementaire et leur intérêt agronomique. Les analyses sont effectuées d'une part par le laboratoire interne de Seine aval, dans le cadre de son autocontrôle et des besoins de son exploitation et, d'autre part, par un laboratoire accrédité COFRAC¹⁷.

L'ensemble des analyses réalisées pour chaque échantillon est consultable sur le site <http://bouesseineaval.siaap.fr>.

4.3.1.2.1 Les éléments-traces

Au même titre que toutes les boues de station d'épuration et les sols agricoles récepteurs, les boues de Seine aval contiennent des éléments dits « indésirables » et qui font l'objet d'un suivi spécifique :

- les Eléments-Traces Métalliques (ETM), plus communément appelés métaux lourds,
- les Composés-Traces Organiques (CTO).

L'arrêté national du 8 janvier 1998, impose un suivi des teneurs en ETM et CTO dans les boues de station d'épuration destinées à l'épandage et dans les sols, et prescrit des valeurs seuils, retenues comme indicateur de l'innocuité des boues.

Pour un tonnage de boues épandues supérieur à 4 800 t de matière sèche par an (c'est le cas de Seine aval, 50 000 tonnes de matières sèches de boues sont produites en routine chaque année), le producteur de boues doit réaliser, chaque année, au minimum 24 analyses pour les ETM et 12 analyses pour les CTO. L'usine Seine aval va au-delà de la réglementation en effectuant 52 analyses annuelles pour les ETM et les CTO.

Les étapes de traitement pour produire les boues de Seine aval entraînent un abattement significatif de la matière organique, et de ce fait, une augmentation relative d'autres éléments (dont les éléments-traces métalliques).

Les boues de Seine aval présentent des teneurs élevées en zinc, élément constitutif des toitures et qui se retrouve, par conséquent, à concentration élevée, dans les eaux pluviales. Toutefois, le zinc est un oligo-élément indispensable aux plantes dans la mesure où il participe à :

- la synthèse de la chlorophylle, des protéines et des acides nucléiques,
- la formation de plusieurs hormones de croissance,
- la croissance précoce et au développement des fruits,
- la constitution de plusieurs systèmes enzymatiques importants.

¹⁷ Comité Français d'Accréditation, créée en 1994, et désigné comme unique instance nationale d'accréditation par le décret du 19 décembre 2008, reconnaissant ainsi l'accréditation comme une activité de puissance publique.

Les teneurs en ETM et CTO des boues de Seine aval restent néanmoins bien inférieures aux valeurs seuils imposées par la réglementation nationale. Si les boues présentaient des teneurs, en un élément, supérieures aux valeurs seuils, elles seraient considérées comme non conformes et, ne pourraient pas être valorisées sur les parcelles agricoles. Elles seraient alors évacuées sur une ISDND¹⁸. Aucune boue thermique de Seine aval destinée à l'épandage direct ne sort du site sans retour des résultats d'analyses.

D'autre part, le SIAAP, s'est engagé à prendre des mesures pour faire baisser les teneurs en ETM et CTO notamment à travers la mise en place de conventions de rejet avec les industriels.

Des actions complémentaires des gestionnaires de réseaux, des services de l'Etat en charge des installations classées, des Agences de l'eau et des SATESE¹⁹ permettent également d'identifier les sources de micropolluants et d'en réduire les flux.

Ces mesures et actions ont permis de diminuer les teneurs en ETM et CTO dans les boues de Seine aval depuis ces 20 dernières années, comme le montrent les figures ci-après :

¹⁸ Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux

¹⁹ Service d'Assistance Technique et d'Étude aux Stations d'Épuration

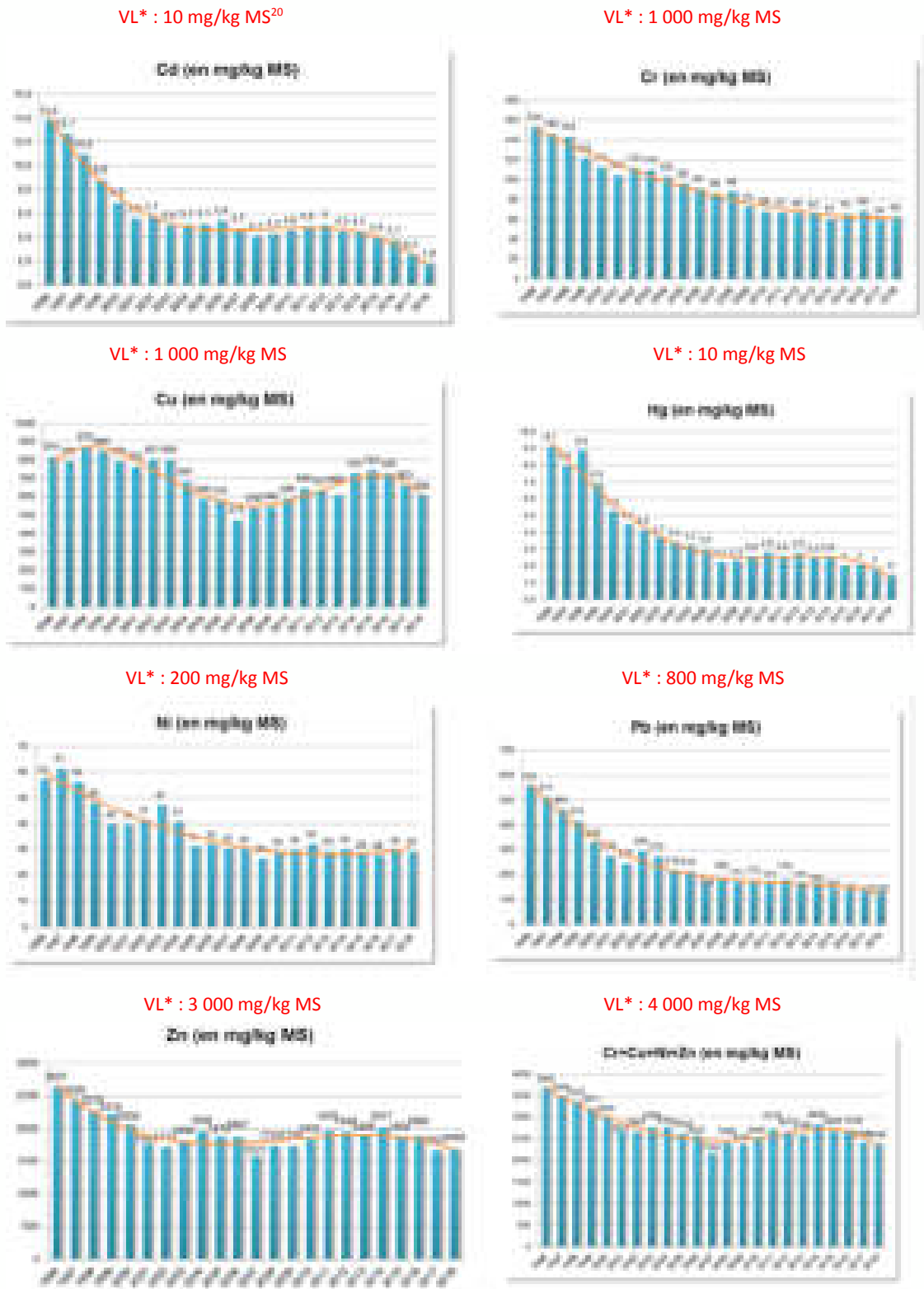


Figure 4: Evolution des teneurs moyennes en ETM depuis 1996

*VL : Valeur Limite

²⁰ Matière Sèche

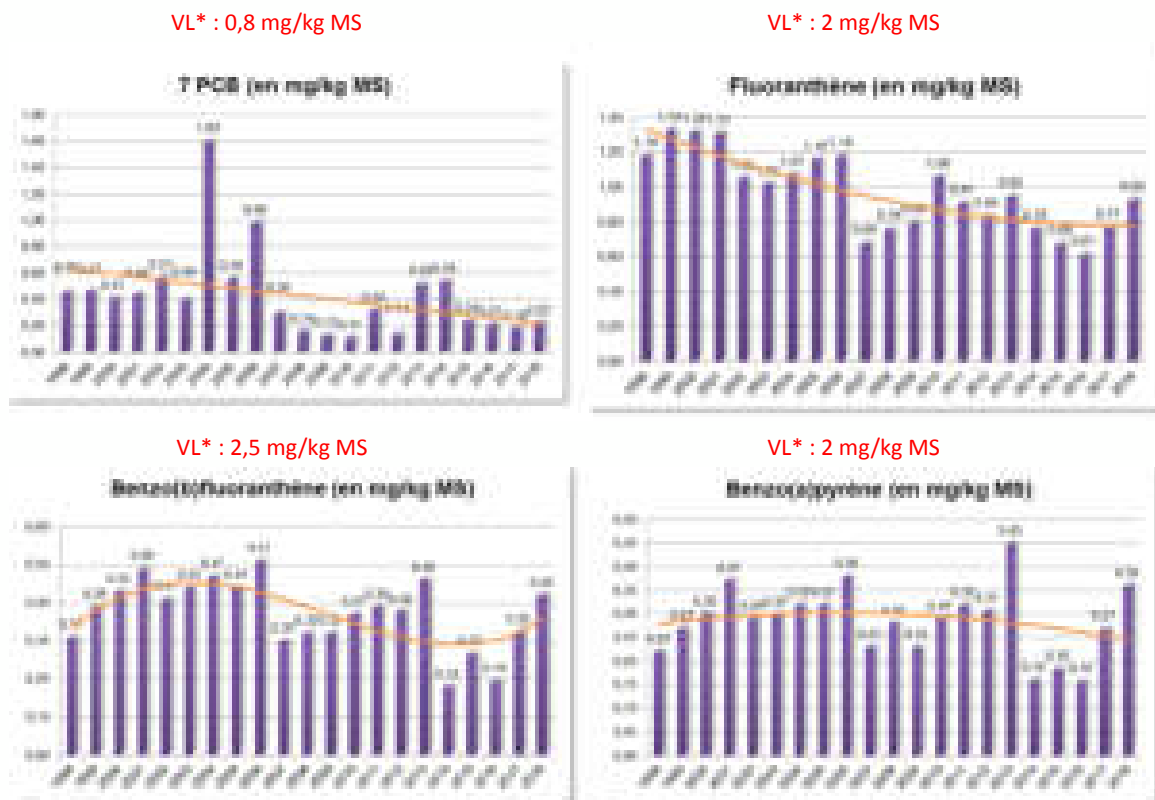


Figure 5: Evolution des teneurs moyennes en CTO depuis 1998

*VL : Valeur Limite

Les boues de Seine aval valorisées en agriculture présentent des teneurs en ETM et CTO inférieures aux valeurs limites définies par l'arrêté du 8 janvier 1998.

Enfin, il est à noter que la part allouée aux épandages de boues de station d'épuration, concernant l'apport en ETM dans les sols, est relativement faible en comparaison à d'autres « produits » ou « déchets ».

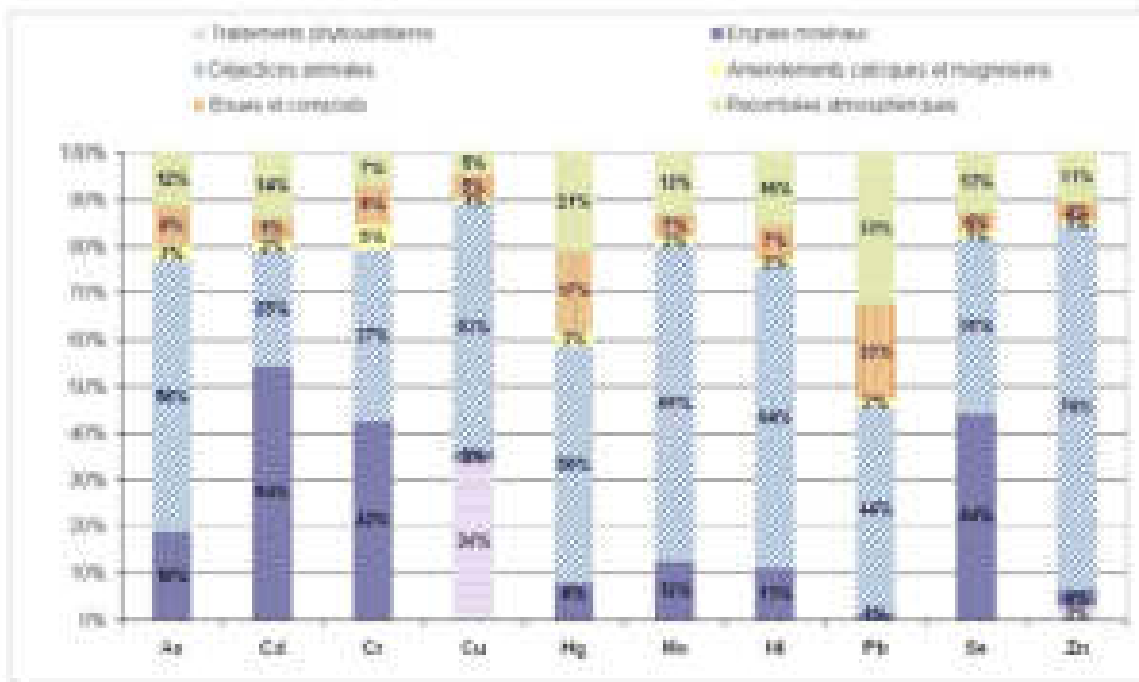


Figure 6: Bilan des flux de contaminants entrants sur les sols agricoles de France métropolitaine
(Source : rapport final, étude réalisée par SOGREAH²¹ pour le compte de l'ADEME, 2007)

4.3.1.2 Hormones et résidus médicamenteux

Les substances pharmaceutiques et vétérinaires et les résidus de leur dégradation par les organismes se retrouvent dans les déjections humaines et animales. Si dans le cas des produits vétérinaires, ils sont la plupart du temps directement émis dans le sol, chez l'Homme ce sont les eaux usées qui constituent le vecteur de diffusion prépondérant dans l'environnement.

Cette problématique émerge depuis le début des années 2000, du fait de l'évolution des modes de gestion hospitaliers et de la montée en puissance des soins pratiqués en « ambulatoire », et a fait l'objet de nombreux programmes de recherche (KNAPPE²², AMPERES²³ ...).

Par définition, les substances pharmaceutiques sont solubles. Dans une station d'épuration, elles ont peu d'affinité pour les particules de boues et restent dans la phase aqueuse où elles sont soit dégradées (c'est le cas notamment des antibiotiques et de certaines hormones de synthèse), soit rejetées dans le milieu avec les eaux épurées.

Les recherches menées dans le cadre du projet AMPERES ont démontré qu'en station d'épuration :

« Le phénomène prépondérant pour les substances pharmaceutiques n'est pas l'accumulation dans les boues, mais la dégradation » (Soulier et al, 2011).

Les substances pharmaceutiques sont donc peu présentes dans les boues car elles sont, pour la plupart, détruites lors du traitement des eaux. Leur présence dans les boues est de l'ordre de la centaine de ng/l (10 000 fois moins que le mg/l).

²¹ Société GRenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques

²² KNAPPE : Knowledge and need assessment on pharmaceutical product in environmental waters

²³ Recherche des teneurs et des flux de micropolluants dans les eaux usées et les boues

4.3.1.2.3 Substances émergentes

Le terme de substance d'intérêt émergent, ou substance émergente, désigne un ensemble de contaminants chimiques ou biologiques, dont les impacts environnementaux et sanitaires sont encore peu connus et dont la présence dans l'environnement, en quantités plus ou moins importantes, est aujourd'hui avérée.

Ce ne sont pas nécessairement des molécules nouvelles, mais qui ne faisaient pas l'objet de recherche jusqu'ici.

Il n'existe pas de liste exhaustive de ces polluants, du fait de leur très grand nombre (plusieurs dizaines de milliers) et de l'évolution permanente de cette liste. Pour ces mêmes raisons, il n'existe actuellement pas ou très peu de réglementations spécifiques sur ces substances.

Depuis 2011, le SIAAP, en association avec le SYPREA²⁴, l'INERIS²⁵, l'ADEME²⁶ et le CNRS²⁷ de Solaize, participe à un vaste programme de recherche sur les substances émergentes dans les boues, les composts de boues et les sols. L'objectif est de dresser un état des lieux précis de la situation actuelle et d'affiner l'évaluation des risques sanitaires et environnementaux qui pourraient y être associés.

Cette étude porte sur plusieurs volets décrits ci-après.

Partie 1 : Recherche et identification des substances émergentes sur la base d'une étude bibliographique

Les molécules concernées sont des molécules pharmaceutiques et d'autres molécules organiques peu connues ou sur lesquelles peu d'information sont disponibles.

Un « screening » des molécules a été réalisé : recherche de 219 molécules sur 27 échantillons de boues représentatifs de la production française :

- boues de stations d'épuration urbaines, allant d'importantes agglomérations à des stations d'épuration en milieu rural,
- ensemble des procédés concernés (digestion, déshydratation, compostage, etc.).

Partie 2 : Réalisation des analyses

Sur la base des éléments identifiés dans la première partie, une liste restreinte de molécules a été retenue et comprend 114 molécules. Des analyses chimiques, des tests d'écotoxicité (analyses normalisées sur animaux terrestres et aquatiques) et des tests de mesures des effets des boues sur les cellules ont été réalisées 4 fois en 6 mois sur 12 stations dont certaines du SIAAP. Cette partie a représenté un grand défi pour le CNRS, qui a mis au point de nouvelles méthodes analytiques (méthode innovante pour mesurer l'impact d'un épandage sur activité hormonale, phénomènes de toxicité cellulaire de type HAP²⁸, dioxine, etc.).

²⁴ Syndicat des Professionnels du Recyclage en Agriculture

²⁵ Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

²⁶ Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

²⁷ Centre National de la Recherche Scientifique

²⁸ Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

Partie 3 : Estimation et mesure du transfert de ces molécules du sol vers la plante

Dans ce volet, des mesures du facteur de bioaccumulation et de leur persistance de ces molécules dans l'environnement ont été réalisées.

Partie 4 : Evaluation des risques

A partir de l'ensemble de ces informations, une évaluation des risques a été réalisée. Les hypothèses prises en compte étaient des hypothèses "conservatrices" (généralement maximisant les risques).

Dans cette partie, les ETM sont pris en considération. L'évaluation des risques a été réalisée en prenant en compte des familles de molécules (et non substance par substance) en raison des informations disponibles.

La durée d'exposition considérée est de 70 ans pour 3 types de populations :

- agriculteurs,
- enfants et adultes riverains des parcelles,
- consommateurs.

Les conclusions de cette étude ont permis de montrer que l'épandage de boues :

***→ n'a pas d'effet d'écotoxicité à la dose agronomique pratiquée,
→ présente un risque sanitaire très inférieur aux valeurs repères (valeurs au-delà desquelles il y a une apparition d'un effet toxique).***

L'étude et ses conclusions ont permis d'identifier de nouveaux axes de recherche : mécanismes, interrelations des molécules etc...

4.3.1.2.4 Les pesticides

La présence de pesticides dans les eaux usées est très diffuse. Elle trouve principalement sa source dans les rejets domestiques (nettoyage de bidons dans l'évier par exemple), le ruissellement des produits utilisés pour le traitement des espaces verts et les déversements sauvages.

D'une manière générale, les pesticides font partie des composés les moins présents dans les eaux usées. Le projet AMPERES, qui a mesuré les concentrations des 21 principaux pesticides et biocides habituellement présents dans les eaux en entrée de stations d'épuration relève des concentrations inférieures à 1ng/L pour la plupart des molécules, et dans tous les cas inférieures à 3µg/L (Budzinski et al, 2009).

Comme les substances pharmaceutiques, la plupart des pesticides sont très solubles dans l'eau et ne sont donc retrouvés dans les boues qu'à l'état de traces. C'est le cas par exemple du glyphosate et de l'AMPA²⁹.

Dans tous les cas, les concentrations de pesticides dans les boues d'épuration restent très faibles.

4.3.2 Les analyses RSDE³⁰ dans les eaux et dans les boues

Suite au passage en CODERST en février 2019 du dossier de demande d'autorisation des boues de Seine aval en Seine-et-Marne, des analyses RSDE seront pratiquées sur les boues en fonction des éléments présents dans les eaux usées. Une centaine de micropolluants sont analysés dans les eaux usées entrantes (famille des Alkylphénols, COHV³¹, PBDE³²...).

²⁹ Acide aminométhylphosphonique : produit de dégradation du glyphosate

³⁰ Rejet de Substances Dangereuses dans l'Eau

³¹ Composés Organo-Halogénés Volatils

³² polybromodiphényléthers

4.3.3 Etat des lieux des réglementations sur les micropolluants

La large palette de molécules concernées et la grande variabilité de modes d'action, de toxicité et de concentration dans l'environnement qui les caractérise, rendent délicate la mise en place d'une réglementation spécifique, qui nécessite d'approfondir les études évoquées ci-dessus.

Le législateur incite la prise en compte progressive de ces substances dites émergentes. Aussi, la problématique des substances émergentes dans les milieux naturels est de plus en plus fréquemment évoquée dans les lois et plans d'actions nationaux à portée sanitaire ou environnementale :

Loi n° 2004-808 (9 août 2004)	Recommande l'étude de résidus d'anticancéreux dans l'eau.
PNSE³³ 1 (2004-2008)	<i>Action n° 11</i> : limiter les pollutions des eaux et des sols aux pesticides et à certaines substances potentiellement dangereuses, notamment les perturbateurs endocriniens et les substances médicamenteuses
Loi Grenelle 1 (3 août 2009)	<i>Article 37</i> : Impose l'établissement d'un plan de réduction des rejets de substances médicamenteuses et de mesures d'anticipation des risques liés aux substances les plus préoccupantes.
PNSE 2 (2009 – 2013)	<i>Action n° 5</i> : réduire les rejets de six substances toxiques dans l'air et l'eau <i>Action n° 29</i> : réduire les apports de certaines substances dans le milieu aquatique <i>Action n° 36</i> : évaluer l'impact sanitaire des différents modes de gestion des déchets ; <i>Action n° 47</i> : améliorer la connaissance et réduire les risques liés aux rejets de médicaments dans l'environnement.
Plan National sur les résidus de médicaments dans les eaux (30 mai 2011)	3 axes : - Evaluer les risques environnementaux et sanitaires, - Gérer les risques environnementaux et sanitaires, - Renforcer et structurer les actions de recherche.
PNSE 3 (2015-2019)	<i>Action n°32</i> : surveiller les substances émergentes prioritaires dans les milieux aquatiques et les captages d'eau destinés à la consommation humaine

Ces textes restent axés sur le vecteur « eau » du rejet dans le milieu, considéré comme majoritaire pour la diffusion des polluants dans l'environnement.

Ainsi, le dernier projet de révision de la directive Européenne 86/278, durcit les valeurs seuils actuelles et intègre de nouvelles molécules, sélectionnées sur la base de leur fréquence d'apparition dans les boues et de leur écotoxicité potentielle.

Le SIAAP, soucieux de connaître au mieux le contenu des boues qu'il produit a effectué en 2004 et 2010 des campagnes d'analyses de ses boues sur l'intégralité des paramètres, mentionnés par la directive :

- HAP : 13 composés
- PCB : 7 composés
- NPE et NP (NonylPhEnols) : 5 composés
- DEHP (Di-2-EthylHexyl) Phtalates) : 6 composés

³³ Plan National Santé Environnement

- PCDD et PCDF (PolyChloroDibenzo-p-Dioxines et PolyChloroDibenzo-p-Furanes) : 17 congénères toxiques + dioxines totales et furanes totaux (sans distinction des composés)
- AOX (Adsorbable Organic Halogens) : AOX totaux (pas de distinction des composés),
- LAS (Linear Alkylbenzen Sulfonate) : LAS totaux (pas de distinction des composés).

Les résultats de ces mesures sont conformes aux valeurs seuils du projet de révision de la directive européenne 86/278.

A ce jour, aucun pays n'a fixé réglementairement de teneurs limites en résidus médicamenteux dans les produits organiques destinés à être épandus sur les sols agricoles.

Toute évolution réglementaire sur le suivi analytique des boues et des sols sera prise en compte par le SIAAP.

4.3.4 Une filière maîtrisée et des contrôles appliqués à la filière

Le SIAAP, en tant que producteur de boues, est responsable du devenir de ses boues. A ce titre, il réalise un auto-contrôle de la production des boues jusqu'à leur valorisation. Le diagramme suivant présente les principaux points de contrôle de la filière de valorisation agricole des boues de Seine aval.

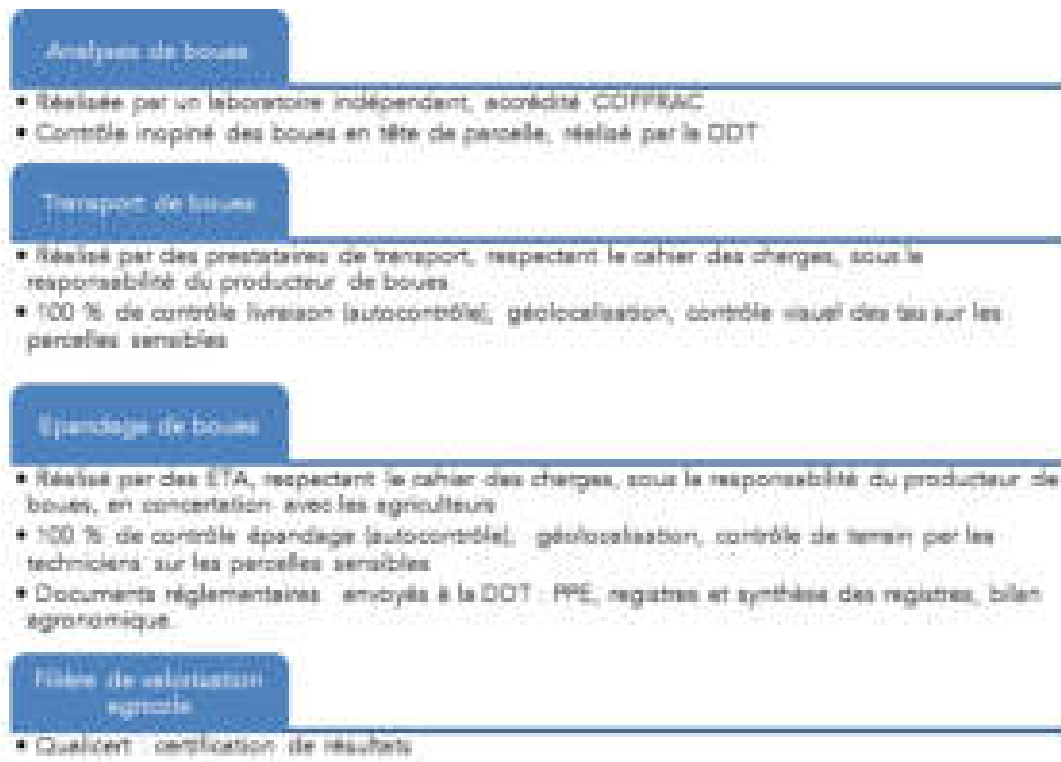


Figure 7: Maîtrise de la filière de valorisation agricole directe

Le site Seine aval et sa filière de valorisation agricole sont contrôlés par plusieurs organismes indépendants, comme l'indique le diagramme suivant.



Figure 8: Organismes intervenant dans le contrôle du site Seine aval

4.3.5 Politique qualité de la filière d'épandage des boues de Seine aval

Dans le cadre de la certification de service Qualicert, les boues de Seine aval ont été classées en 3 catégories, définies sur la base de leur valeur fertilisante et de valeurs limites pour les ETM et les CTO :

- **Boue Seine aval +** : lot conforme à la réglementation relative à la valorisation agricole et dont les critères (siccité, teneurs en éléments fertilisants et éléments-traces) respectent ceux définis par la certification Qualicert (Cf Tableau 7).
- **Boue réglementaire** : lot conforme à la réglementation relative à la valorisation agricole (arrêté du 08/01/1998) mais pour lequel au moins un des critères de la certification Qualicert n'est pas atteint.
- **Boue non conforme** : l'un des critères de l'arrêté du 08/01/1998 n'est pas respecté. Les boues ne sont pas valorisables en agriculture et sont dirigées vers une ISDND.

Les **boues de Seine aval +** et les **boues réglementaires** sont des boues valorisables en agriculture ou admissible en compostage, car elles respectent les seuils de l'arrêté du 08/01/1998 en ETM et CTO.

Tableau 7: Composition en éléments fertilisants, ETM et CTO des boues de Seine aval

Détermination	Unité	Composition des boues de Seine aval épandues en Eure-et-Loir – campagne 2018*	Valeurs limites arrêté du 8 janvier 1998	Seuil boues Seine aval +
PARAMÈTRE AGRONOMIQUE				
C/N ³⁴	-	14,4	Sans objet	[8-20]
MS	%	52		[50-60]
MO ³⁵	kg/t MB ³⁶	199,5		-
P2O5 ³⁷		44,5		[35-55]
SO3 ³⁸		44,5		-
NTK ³⁹		9,4		-
K2O ⁴⁰		0,9		-
CaO ⁴¹		59,1		[60-80]
ETM				
Cd	mg/kg MS	3	10	6,5
Cr		61,9	1 000	650
Cu		626,2	1000	1 000
Hg		1,7	10	6,5
Ni		31,5	200	130
Pb		139	800	520
Zn		1633,8	3 000	3 000
CTO				
7 PCB	mg/kg de MS	0,22	0,8	0,4
Fluoranthène		0,9	5	2,5
Benzo(b) fluoranthène		0,41	2,5	1,25
Benzo(a)pyrène		0,34	2	1

* Les données sont exprimées en moyennes pondérées : les teneurs obtenues pour chaque analyse sont pondérées par le tonnage en matière sèche du lot correspondant.

Pour la campagne 2018, 18 semaines de production de boues sur les 52 ont été classées **Boue Seine aval +**. Les agriculteurs-utilisateurs sont informés de la catégorie de boues qu'ils reçoivent pour fertiliser leur parcelle. La seule différence dans la mise en œuvre de la filière entre les **boues réglementaires** et **boues de Seine aval +** est le raisonnement de la dose.

³⁴ rapport massique carbone sur azote

³⁵ Matière Organique

³⁶ Matière Brute

³⁷ Phosphore

³⁸ Trioxyde de soufre

³⁹ Nitrogen Total Kjeldahl (Azote total Kjeldahl)

⁴⁰ Oxyde de potassium

⁴¹ Oxyde de calcium

4.3.6 Le principe de la valorisation

La valorisation agricole des boues urbaines est basée sur le principe de leur intérêt agronomique et sur l'innocuité de leur épandage.

Selon l'article R.211-31 du livre II du code de l'environnement : titre 1er – chapitre 1er – section 2 – sous-section 2, « *l'épandage des boues ne peut être pratiqué que si celles-ci présentent un intérêt pour les sols ou pour la nutrition des cultures et des plantations* ».

Les boues de Seine aval, de par leurs teneurs en éléments fertilisants et amendants, présentent un intérêt agronomique multiple qui justifie la valorisation agricole :

- pour les sols par l'apport amendant de matière organique et de calcium,
- pour les cultures par l'apport de phosphore principalement, et également de magnésium et de soufre.

L'épandage des boues de Seine aval permet d'apporter une partie des éléments fertilisants nécessaires à la croissance de la culture. Il participe également à l'entretien de la structure du sol par l'apport de matière organique, et à l'entretien calcique du sol par l'apport de calcium (Cf. Chapitre 3 du document d'Étude Préalable du dossier de demande d'autorisation).

Les éléments apportés par l'épandage sont pris en compte dans le pilotage de la fertilisation raisonnée menée par l'agriculteur-utilisateur, en remplacement de l'utilisation de produits plus conventionnels (engrais, chaux...). La richesse en phosphore des boues de Seine aval (33,7 à 51,8 kg/t de MB en 2018) permet aux agriculteurs de réaliser une impasse en engrais phosphatés sur l'ensemble de la rotation. En effet, le raisonnement de la dose présenté dans le chapitre 4 du document d'Étude préalable, permet en prenant en compte de la teneur en phosphore des boues qui seront épandues et du temps de retour sur la même parcelle de couvrir la totalité des besoins de la rotation en phosphore.

4.3.7 Un contrôle des micropolluants à la source

Les eaux usées industrielles sont susceptibles de contenir des molécules toxiques pouvant s'accumuler dans les boues ou être rejetées dans le milieu par le biais des eaux usées.

Afin de parer à toute éventualité de pollution, le SIAAP contrôle étroitement les modalités de raccord direct ou indirect des industriels à son réseau.

Outre les prescriptions réglementaires, le conseil d'administration du SIAAP a ainsi approuvé un Règlement d'Assainissement le 14/12/2005 (disponible sur le site www.siaap.fr). Il subordonne le déversement direct ou indirect d'eaux usées dans le réseau à l'émission :

- d'un arrêté d'autorisation de raccordement au réseau,
- d'un arrêté d'autorisation de rejet,
- d'une convention spéciale de déversement pour les rejets non-domestiques.

Ces arrêtés sont délivrés sous réserve que l'industriel concerné garantisse la qualité de ses rejets. Un certain nombre de substances sont interdites par le SIAAP.

D'une manière générale, sont interdits :

- toute substance visée par la réglementation,
- les hydrocarbures et leurs dérivés,
- les acides et bases concentrés,

- les substances radioactives,
- les colles, goudrons, peintures...
- les déchets industriels et banaux,...

Par ailleurs, les arrêtés d'autorisation de déversement délivrés aux industriels définissent les « obligations de l'usager raccordé, en matière de dispositifs de prétraitement, de dépollution, d'autocontrôle et de maintenance » (Règlement d'Assainissement, Article 23).

Le SIAAP réalise, avec les gestionnaires de réseaux d'assainissement et les services de l'État en charge du contrôle des installations classées, les agences de l'eau et les SATESE, un effort important pour contrôler les rejets d'effluents non domestiques, identifier les sources de micropolluants et en réduire le flux.

4.3.8 Impact des épandages sur les organismes vivants (flore, faune sauvage, faune du sol)

Des tests de toxicité et d'écotoxicité ont été réalisés sur les boues de Seine aval, afin de déterminer leurs impacts sur les organismes vivants.

Ces tests suivent tous le même principe général : il s'agit de mettre en culture un organisme vivant (plante, algue ou animal), choisi pour sa sensibilité aux molécules toxiques, dans des conditions contrôlées et en présence de différentes doses du produit testé. Un indicateur (taux d'inhibition de la croissance, taux de mortalité...) est mesuré à chaque dose afin de déterminer le niveau de toxicité du produit.

Les résultats de ces tests s'expriment en CE-50, qui correspondent à la concentration, en pourcentage, de boues (CE : Concentration Efficace), nécessaire pour observer une toxicité sur 50% des organismes observés.

Il n'existe pas de référence réglementaire actuellement pour l'évaluation de la toxicité des boues d'épuration, aussi les résultats ont-ils été comparés aux valeurs seuils proposées par l'ADEME et le MEDDTL⁴² pour l'évaluation de l'écotoxicité des déchets dangereux.

Le tableau suivant présente les tests réalisés sur des boues de station d'épuration.

Tableau 8: Tests de toxicité et d'écotoxicité réalisés sur des boues de station d'épuration

Type de test	Seuil ADEME: Toxicité si...	Résultat
Phytotoxicité– Test d'inhibition de la germination sur cresson	CE-50 < 10%	Aucune inhibition constatée en présence des boues.
Phytotoxicité– Test d'inhibition de la croissance sur laitue	CE-50 < 10%	Croissance stimulée en présence de boues.
Toxicité chronique– test de mortalité des vers de terre	CE-50 < 10%	Aucun décès après 14 jours passés dans 100% de concentration en boues.
Toxicité aigüe sur éluat – test d'immobilisation de Daphnies (microorganisme aquatique)	CE-50 (48h) < 1%	CE-50 (48h) = 28% Les boues ne sont pas toxiques d'après les critères de l'ADEME.
Toxicité chronique sur éluat- test d'inhibition de la croissance de P. subcapitata (algue)	CE-20 (72h) < 1%	CE-20 (72h) = 15,1% Les boues de Seine aval ne présentent pas de toxicité chronique pour <i>P.subcapitata</i> selon les seuils ADEME.

Tous les tests réalisés concluent à l'innocuité des boues de Seine aval.

⁴² Ministère de l'Écologie, du Développement Durable des Transports et du Logement

4.3.9 Protection de la ressource en eau

4.3.9.1 Protection des eaux de surface et souterraines

Certaines remarques concernent la pollution des cours d'eaux, des nappes phréatiques ou encore des captages en eau potable.

Plusieurs dispositions ont été prises afin de limiter les incidences des épandages de boues de Seine aval sur la ressource en eau.

4.3.9.1.1 Les dispositions face au risque de pollution des eaux des surface

Pour l'activité d'épandage comme pour les stockages, l'entraînement par ruissellement vers les cours d'eau est très limité.

En effet, les épandages respectent les distances réglementaires imposées par l'arrêté du 8 janvier 1998, le Programme d'Actions Régional (PAR) du Centre-Val de Loir du 28 mai 2014 et le Programme d'Actions National (PAN) du 19 décembre 2011 complété par l'arrêté modificatif du 23 octobre 2013 et du 11 novembre 2016, à mettre en œuvre en vue de la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole.

L'épandage n'est donc pas pratiqué :

- à moins de 10 m s'il existe une bande enherbée vierge de tout intrant de 10 m longeant les cours d'eau,
- à moins de 35 m des puits, sources, berges des cours d'eau lorsque la pente est inférieure à 7% et qu'il n'existe pas de bande enherbée,
- à moins de 100 m des berges des cours d'eau permanents et temporaires lorsque la pente est supérieure à 7%.

Seul le ruissellement de particules de boues entraînées par les pluies pourrait donc engendrer la présence de boues dans les eaux de surface. Toutefois, les risques que cela se produise sont limités car :

- les épandages ont lieu en période de déficit hydrique ($(P^{43}-ETP^{44}) < 10\text{mm}$), périodes où les risques de ruissellement sont moindres,
- l'enfouissement des boues dans les 48h à moins de 100m des habitations et aux lieux occupés par le public (zones de loisirs...),
- les boues sont épandues à plus de 35 m des cours d'eau ou 10 m s'il existe une bande enherbée de 10m.

Le SIAAP a réalisé 2 essais (1999 et 2014) afin de mesurer l'impact d'un entreposage de boues thermiques de Seine aval en tête de parcelle. Ils sont détaillés au chapitre 4.10.6.2 *Accumulations dues au stockage* du thème 10. Les essais montrent que dans le respect des conditions et des distances d'isolement, imposées par la réglementation, les risques de pollution des eaux et des sols lors du stockage des boues de Seine aval ne sont pas significatifs.

⁴³ Précipitation

⁴⁴ Evapotranspiration potentielle

4.3.9.1.2 Les dispositions face au risque de pollution des eaux souterraines

Les eaux souterraines concernent les puits, des forages, les sources et autres points de captage d'alimentation en eau potable.

Des distances d'isolement identiques à celles respectées dans le cadre des dispositions prises pour protéger les eaux de surface, sont observées.

De plus, l'épandage n'est donc pas pratiqué :

- à moins de 35 m de bétouilles et marnières sans bande enherbée de protection de 5 m,
- dans les périmètres de protection de captage (immédiat et rapproché).

Les nappes phréatiques ont également été prises en compte, et localisées à l'aide de cartes géologiques du BRGM⁴⁵. Les sous-sols géologiques ont été étudiés afin de limiter les risques de contamination des nappes par l'activité d'épandage (cf. Chapitre 4 du document d'Étude préalable du dossier de demande d'autorisation).

Il est également important de rappeler que comme présenté dans le chapitre 4.3.1.2 *Composition des boues de seine aval*, les teneurs en ETM et CTO ont fortement diminuées en 20 ans.

Prenons l'exemple du Cadmium et du Nickel cités par M. Bourg, leurs teneurs respectives sont passées de 13,8 à 1,8 mg/kg de MS et de 57 à 29 mg/kg de MS de 1996 à 2018. Elles sont très inférieures aux seuils fixés par la réglementation.

Enfin, l'épandage des boues est interdit sur les sols dont le pH⁴⁶ est inférieur à 6. En dessous de cette valeur les ETM sont mobiles et plus facilement absorbable par les plantes.

4.3.9.2 Les captages d'Alimentation en Eau Potable (AEP)

Conformément à plusieurs directives européennes et à la loi sur l'eau de 1992, les points de captage d'eau potable doivent bénéficier d'un périmètre de protection afin d'éviter les pollutions liées aux activités humaines usuelles et de réduire le risque de pollution accidentelle qui pourrait entraîner une contamination de l'eau.

Aussi, pour chaque captage, un hydrogéologue indépendant et agréé en matière d'hygiène publique par le ministère chargé de la santé est mandaté pour étudier et définir jusqu'à trois niveaux de protection autour du captage. Ces niveaux de protection se traduisent par trois types de périmètres (Cf. Chapitre 4.3.4 de l'étude préalable) :

- périmètre de protection immédiat,
- périmètre de protection rapproché,
- périmètre de protection éloigné.

Toute parcelle du périmètre d'épandage située sur un périmètre de protection de captage d'alimentation en eau potable est identifiée et fait l'objet d'une attention toute particulière.

En effet, lors de l'élaboration du dossier de demande d'autorisation d'épandage des boues de Seine aval en Eure-et-Loir, chaque captage (avec ses périmètres de protection rapproché et éloigné) a été pris en compte. Ils sont cartographiés et repérés dans le document d'Atlas cartographique.

Pour les captages d'eau bénéficiant de périmètres de protection, le stockage et l'épandage de boues sont interdits sur les périmètres de protection immédiats et rapprochés.

⁴⁵ Bureau de Recherches Géologiques et Minières

⁴⁶ Potentiel Hydrogène

4.3.9.3 Les Aires d’Alimentation de Captage prioritaire (AAC)

4.3.9.3.1 Qu’est ce qu’une AAC ?

D’autres périmètres de protection voient le jour. En effet, suite au Grenelle de l’Environnement, des aires d’alimentation de captages prioritaires ont été définies dans le but de protéger les captages des pollutions diffuses (à la différence des périmètres de protection permettant de les protéger des pollutions ponctuelles et/ou accidentelles). Les Ministères en charge du développement durable, de la santé et de l’agriculture ont dressé une liste de 507 captages parmi les plus menacés par les pollutions diffuses. Suite à la conférence environnementale en 2013, 500 captages supplémentaires ont été identifiés comme prioritaires. Soit un total de 1000 captages prioritaires à l’échelle de la France, dont 30 sont situés dans le département de l’Eure-et-Loir.

Les Aires d’Alimentation de Captage

Echelle d’actions efficaces pour lutter contre les pollutions diffuses

(100%) Aire d’Alimentation de Captage

correspond à la surface totale sur laquelle une goutte d’eau tomber au sol rejoindra le captage.

(20-50%) Zone de Protection de l’AAC

ensemble des secteurs de l’Aire d’Alimentation de Captage les plus vulnérables vis à vis des pollutions diffuses. Elle correspond à une échelle d’intervention réaliste pour améliorer la qualité de l’eau au captage. En fonction du type de captage et de son environnement, il peut y avoir une ou plusieurs zones distinctes.



Figure 9: Échelles de protection d’un captage d’eau potable

Source : Agence de l’Eau Rhône-Méditerranée-Corse

4.3.9.3.2 Comment protéger une AAC ?

Le Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie ainsi que le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt ont conjointement publié en juin 2013 un guide⁴⁷ méthodologique sur la protection des AAC en eau potable contre les fertilisants et les pesticides.

La France se doit d'atteindre l'objectif fixé par la directive-cadre sur l'eau de restaurer ou maintenir le bon état des ressources en eau.

Les réglementations spécifiques aux activités agricoles applicables sur ces territoires sont les suivantes :

- le programme d'actions mis en œuvre dans les zones vulnérables : il est constitué d'un programme d'actions national renforcé par un programme d'actions régional depuis mai 2014 ;
- la conditionnalité des aides PAC⁴⁸ : concernant l'environnement et en particulier l'enjeu eau ; il s'agit essentiellement de se conformer aux exigences de la réglementation en vigueur (notamment la Directive « Nitrates », n° 91/676/CEE) et de respecter les Bonnes Conditions Agro-Environnementales (BCAE).

Cas des nitrates :

La contamination par les nitrates agricoles provient essentiellement de l'infiltration des nitrates dissous dans l'eau du sol. Environ 66% des nitrates dans les ressources en eau proviennent des activités agricoles.

Ces risques de lixiviation d'azote vers les eaux de surface et souterraines résultent d'un déséquilibre entre apports en azote (par fertilisation, minéralisation de la matière organique du sol, ...) et exportations par les plantes. Cet équilibre entre besoin et fourniture doit tenir compte, non seulement des apports anthropiques (fertilisation, pâturage...), mais aussi de l'azote naturellement présent dans le sol.

Ils sont donc directement dépendants de plusieurs facteurs, comme les conditions pédoclimatiques et météorologiques et les plantes cultivées.

Les boues de Seine aval ne contiennent qu'une faible part d'azote : 9,6 kg/tMB en moyenne en 2018. En respectant le plafond des 170 kg d'azote/ha/an (Programme d'Actions National nitrates), le risque de lixiviation des nitrates est limité.

Cas du phosphore :

La contamination par le phosphore diffus d'origine agricole, source d'eutrophisation tout particulièrement des plans d'eau et des cours d'eau, provient essentiellement du phosphore adsorbé sur les particules de sol entraînées avec l'eau de ruissellement lors des forts orages.

Les activités agricoles représentent 90% des flux de phosphore vers les milieux mais ne contribuent qu'à 25% de la teneur des eaux en phosphore. Cela s'explique par le fait que l'agriculture met en jeu des formes peu solubles, dont le transfert dans l'eau n'est pas direct, contrairement au phosphore provenant des activités domestiques et industrielles contenu dans les rejets de stations d'épuration. Le transfert vers les eaux du phosphore agricole se fait essentiellement par déplacement de particules solides du sol auxquelles sont fixés le phosphore et aussi les résidus phytosanitaires. Par ailleurs, ces apports sont exportés par les cultures et seulement 1 à 3 % des apports au sol se retrouvent dans l'eau.

⁴⁷ Guide méthodologique – Protection d'aire d'alimentation de captage en eau potable contre les pollutions liées à l'utilisation de fertilisants et de pesticides – MEDDE et MAAF – Juin 2013

⁴⁸ PAC : Politique Agricole Commune

L'équilibre de la fertilisation phosphorée est plus difficile à calculer que dans le cas de l'azote, car le bilan du système sol/plante est fortement dépendant de la variation des stocks de phosphore du sol. En particulier, des apports en phosphore supérieurs aux besoins des plantes n'impliquent pas nécessairement un bilan excédentaire du système sol/plante tant que les capacités d'absorption du sol en phosphore ne sont pas dépassées. En revanche, dans un sol saturé en phosphore, les apports pourront être égaux voire inférieurs aux besoins des cultures sans pour autant pénaliser la croissance de ces dernières. La fertilisation phosphorée se raisonne donc sur plusieurs années.

Les boues de Seine aval sont riches en phosphore, de 43,8 kg/tMB en moyenne en 2018. Ce phosphore est peu soluble, et donc peu lixiviable. Les doses appliquées dans le cadre de l'exploitation de la filière sont calculées afin de couvrir les exportations en phosphore à l'échelle de la rotation de l'agriculteur-utilisateur (cf. Chapitre 5 de l'étude préalable).

Une veille réglementaire est réalisée annuellement par le SIAAP afin d'actualiser et de prendre en compte toutes les modifications liées aux captages d'eau potables et aux mesures de protection. Ces évolutions sont prises en compte pour l'actualisation de l'aptitude des parcelles à l'épandage.

4.3.10 Suivi des sols

L'arrêté du 8 janvier 1998 prévoit 3 dispositions particulières pour garantir l'innocuité des épandages de boues vis-à-vis des sols agricoles :

- des valeurs limites en ETM dans les sols avant épandage,
- des valeurs limites en ETM et CTO dans les boues,
- des flux maximum cumulés apportés par les boues (g ou mg/m²) en ETM et CTO à ne pas dépasser sur une période de 10 ans.

L'épandage des boues de Seine aval ne pourra être réalisé que sur des parcelles dont le pH est supérieur à 6 et dont les teneurs en ETM et CTO sont inférieures aux valeurs seuils définies dans l'arrêté du 8 janvier 1998.

Afin de valider la conformité des sols à recevoir des boues, des analyses de sol (pH et ETM) sont réalisées sur des points de référence, au nombre minimum de 1 analyse pour 20 ha par zone homogène et par exploitation agricole. Sur le périmètre d'épandage concerné par la présente demande, le ratio est de 1 analyse pour environ 17,6 ha.

Ces analyses aux points de référence sont réalisées en amont de l'élaboration du dossier et servent de témoin. Dans le cadre de la demande d'autorisation pour la valorisation des boues de Seine aval en Eure-et-Loir, 364 points de référence sont concernés.

Pour vérifier l'évolution des teneurs en éléments-traces métalliques dans les sols, de nouvelles analyses sont réalisées sur ces points de référence, avant échéance des 10 ans.

Les flux en ETM et CTO apportés par les boues sont également contrôlés par l'intermédiaire du suivi et de l'auto-surveillance mis en œuvre chaque année. Plusieurs outils, développés par SEDE, prestataire du SIAAP, permettent de contrôler les flux cumulés, de prévenir l'atteinte des valeurs limites pour chaque parcelle, et, par conséquent, de fiabiliser le respect de la réglementation :

- les **fiches apports** : permettent le suivi des apports en MS, ETM et CTO. La composition du ou des lots de boues épandus sur la parcelle combinée à la dose d'épandage appliquée permet le calcul des flux sur chaque parcelle,
- le **logiciel de suivi** : permet d'archiver l'ensemble des fiches apports pour chacune des parcelles et d'effectuer le cumul des flux chaque année d'épandage,

- le **calcul des flux prévisionnels** : permet d'anticiper le respect des valeurs limites réglementaires à l'issue du prochain épandage. Une simulation des flux prévisionnels est effectuée, qui permet de conclure sur la possibilité d'épandre ou non la parcelle au cours de la campagne.

4.3.11 Fragilité des sols

Le GIS Sol⁴⁹ est le Groupement d'Intérêt Scientifique pour les Sols qui rassemble le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire, l'IRD⁵⁰, l'Inventaire Forestier National, l'INRA⁵¹, le ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, l'ADEME. Ce groupement collecte les données sur les analyses de sols et observe l'évolution de l'état du sol à travers un réseau.

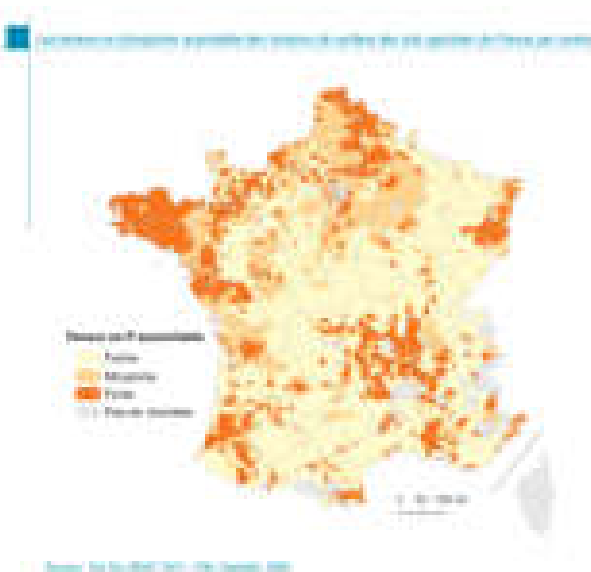


Le GIS Sol a présenté en novembre 2011 le 1^{er} bilan de « l'état des sols en France ». Le bilan est présenté sous trois grands thèmes : les services rendus par les sols, la diversité des sols en France et l'état des sols en France et son évolution. Ces résultats ont fait l'objet d'un rapport consultable en ligne à partir du lien suivant : <http://www.gissol.fr/>

Le bilan présente notamment les pressions subies par les sols sous l'action de l'Homme. Il prend en compte la pression démographique, celles des activités humaines mais aussi les événements extrêmes (inondations, glissements de terrain, salinisation...), l'érosion, la baisse de la teneur en matière organique, etc.

Les conclusions du 1^{er} bilan de « l'état des sols en France » sont les suivantes :

- la matière organique dans les sols a tendance à baisser,
- l'évaluation doit se faire en fonction d'un référentiel local.



⁴⁹ Groupement d'intérêt scientifique pour les Sols

⁵⁰ Institut de Recherche pour le Développement

⁵¹ Institut national de recherche agronomique

De plus, différents enjeux ont été identifiés vis-à-vis de la matière organique dans les sols :

- amélioration de la structure des sols,
- protection contre la battance et l'érosion des sols,
- réservoir en sels minéraux,
- rétention en eau,
- diminution de la compacité,
- maintien de la biodiversité.

Le phosphore dans les sols fait également l'objet d'un suivi par le GIS Sol. Les teneurs en phosphore des sols sont très hétérogènes en fonction des types de secteurs agricoles.

Le 1^{er} bilan met en avant les points suivants :

- beaucoup de sols ont des teneurs en phosphore relativement faibles,
- les fortes teneurs sont principalement situées en zones d'élevage et d'excédents structurels (teneurs en phosphore en hausse) et en zones d'anciens épandages d'origine minière (teneurs en phosphore à l'équilibre ou en baisse),
- les apports moyens de phosphore minéral sont en constante diminution.

En conclusion, le GIS Sol rapporte que la fertilité chimique des sols agricoles est globalement satisfaisante, mais son maintien à long terme nécessitera une meilleure gestion et un recyclage accru de certains éléments comme par exemple le phosphore. Les ressources en phosphore sont en constante diminution avec l'épuisement des gisements miniers. Une réflexion est menée pour identifier les différentes ressources en phosphore dont les boues de station d'épuration font partie.

Dans ce cadre, les épandages de boues en général et de Seine aval en particulier participent à maintenir le bon état des sols épandus.

- apport de phosphore dit renouvelable (non issu de ressources minières),
- apport de matière organique (1,2 tonne environ à chaque épandage).

4.3.12 Les risques liées à la présence d'agents pathogènes dans les boues

Les éléments de réponses sont développés dans le thème 5 : "Les atteintes à la santé".

4.4 Thème 4 : Le recul d'expérience et le principe de précaution

Les éléments ci-après permettent de compléter le dossier de demande d'autorisation afin de répondre à certaines observations formulées au cours de l'enquête.

Les observations reprises dans le thème 4 : "Le recul d'expérience et le principe de précaution" par la commission d'enquête évoquent différents sujets comme :

- le manque de recul sur l'épandage des boues
- l'application du principe de précaution
- la traçabilité des boues

4.4.1 Le recul d'expérience

4.4.1.1 Intérêts agronomiques et écosystémiques des produits résiduaux organiques

Le projet ECOSOM, dirigé par l'INRA, en partenariat avec Veolia, Alterra et l'université d'Umea, s'est attaché à caractériser les effets de l'épandage de Produits Résiduaux Organiques (PRO), dont font partie les boues d'épuration, sur les services écosystémiques⁵² rendus par les sols.

Ce projet est basé sur les résultats de deux essais au champ menés sur le long terme :

- Le dispositif Qualiagro : il s'agit d'un essai au champ, initié en 1998 dans le cadre d'une coopération INRA - Veolia Recherche & Innovation. Le site QualiAgro est un des sites du SOERE PRO (Système d'Observations et d'Expérimentations pour la Recherche en Environnement sur les Produits Résiduaux Organiques), réseau d'essais au champ dédiés à l'étude des effets des épandages répétés de PRO. L'objectif de cet essai est de comparer les effets d'apports répétés de différents PRO sur les composantes d'un agrosystème (sol, plantes, eau, air). Les effets de 4 amendements organiques y sont étudiés et comparés à des traitements témoins sans apport organique.
- La plateforme d'essai de Colmar : cette plateforme a été initiée en collaboration avec le SMRA (Syndicat Mixte pour le Recyclage Agricole du Haut-Rhin) et l'ARAA (Association pour la Relance Agronomique en Alsace) en 2000. Elle est également un site du SOERE PRO localisé au sein de l'Unité expérimentale de l'INRA de Colmar en Alsace. L'objectif de cet essai est de comparer les effets d'apports répétés de différents PRO sur les composantes d'un agrosystème (sol, plantes, eau, air). Les effets de 5 amendements organiques y sont étudiés et comparés à des traitements témoins (TEM) sans apport organique.

L'étude menée dans le cadre du projet ECOSOM a permis de conclure que l'apport répété de PRO⁵³ :

- « peut permettre d'atteindre des rendements équivalents voire supérieurs aux rendements atteints avec une fertilisation azotée minérale seule »,
- « [peut] se substituer partiellement aux engrais minéraux »,
- « [entraîne] une augmentation progressive de la stabilité structurale ainsi qu'une plus faible résistance à la pénétration du sol. La teneur élevée en matière organique des sols amendés conduit à une plus grande fertilité physique de ces sols »,

⁵² Service écosystémique : bénéfices que les êtres humains tirent du fonctionnement des écosystèmes (production d'oxygène, épuration naturelle de l'eau, fertilité des sols...)

⁵³ Source : INRA, VERI : *Apports de produits résiduaux – Quels effets sur les services écosystémiques rendus par les sols*. Décembre 2014.

- « *[stimule] la biomasse microbienne du sol rapidement après épandage et les effets persistent à moyen-long terme* »,
- « *[augmente] la densité de vers de terre et la proportion de vers anéciques qui favorisent l'incorporation de la matière organique des PRO à celle du sol et l'augmentation de la macroporosité dans le sol via le creusement de galeries* ».

Le retour d'expérience du SIAAP lié à plusieurs dizaines d'années d'épandage confirme les conclusions du projet ECOSOM.

4.4.1.2 Evaluation des risques sanitaires liés au retour au sol des boues d'épuration

Soucieux de déterminer l'impact sur la santé du retour au sol des boues d'épuration, l'ADEME, le CNRS, la FP2E, l'INERIS, le SIAAP et le SYPREA ont collaboré à la réalisation d'une évaluation des risques sanitaires. Le suivi du bon déroulement de cette étude a été réalisé par un comité d'experts indépendants, qui a notamment contribué à définir la méthodologie employée et a validé les principales hypothèses prises en compte.

Cette étude est plus amplement détaillée dans le *chapitre 4.3.1.2.3 Substances émergentes*. Les principales conclusions sont que « dans le cadre des scénarios et hypothèses retenus, le risque lié au retour au sol des boues est nettement inférieur aux valeurs de référence qui fixent le niveau de risque acceptable. »

4.4.1.3 Bilan et perspectives réglementaires

Le ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche, et le ministère de l'énergie, du développement durable et de la mer ont confié en 2009 au Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD) et au Conseil général de l'agriculture, de l'alimentation et des espaces ruraux (CGAAER), une réflexion portant sur l'évaluation du cadre réglementaire de l'épandage de boues d'épuration.

Ce bilan fait état de l'adaptation de la réglementation à ses objectifs initiaux, et propose des axes d'évolution de l'encadrement réglementaire de la filière d'épandage. Les conclusions de ce rapport sont reprises ci-après.

« Le cadre réglementaire actuel de l'épandage agricole de boues est, de l'avis général, considéré comme satisfaisant. Les bilans de la cellule de veille sanitaire ont montré l'absence d'implication de l'épandage dans l'apparition de pathologies animales. Le débat national sur l'épandage agricole est aujourd'hui dépassionné. [...] Il reste toutefois nécessaire d'exercer une vigilance constante sur les facteurs potentiellement générateurs de tension rappelés dans ce rapport. Les objectifs de la Commission européenne et les engagements du Grenelle de l'environnement vont tous les deux dans le sens d'un recours accru à l'épandage agricole, que toutes les études d'analyse du cycle de vie considèrent comme la meilleure solution. »

Une réflexion prospective a ensuite été menée par ces mêmes organismes sur le cadre réglementaire de l'épandage de l'ensemble des matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) sur les sols agricoles. Les MAFOR sont constituées à 80 % d'effluents d'élevage mais également de déchets organiques et de boues d'origine urbaine ou industrielle. Cette réflexion a fait l'objet d'un rapport publié en juillet 2015.

Les principales prescriptions à respecter tout au long du processus de valorisation agricole des MAFOR ont été analysées : élaboration et modification des plans d'épandage, planification et suivi des épandages, encadrement des apports en fertilisants et en contaminants, réalisation des opérations d'épandage (distances d'exclusion, périodes d'interdiction, délais d'enfouissement).

Les conclusions de la mission sont que « *les dispositifs en place pour garantir la maîtrise de la contamination sont globalement considérés comme satisfaisants* ». Cependant, elle met en évidence la complexité et la diversité des réglementations liées à l'épandage des MAFOR, et propose un cadre réglementaire unique pour l'ensemble des MAFOR (règles de stockage et d'épandage...).

En avril 2018, l'ADEME a sorti un guide pratique « *MATières Fertilisantes Recyclées Organiques : Gestion des épandages* ». Les MAFOR sont une ressource renouvelable pour fertiliser et amender les sols. Ce guide précise que 73% des boues de STEP⁵⁴ sont épandues dont 31% après compostage. De plus le respect des réglementations et des bonnes pratiques limitent les risques sanitaires et environnementaux (suivi analytique, dose, date d'épandage, distance d'isolement,...).

4.4.1.4 Le programme « 4 pour mille »

A l'occasion de l'année internationale des sols en 2015, le ministre français de l'agriculture a annoncé la mise en place d'un programme de recherche international, le « 4 pour mille », dont l'objectif est de développer la recherche agronomique afin d'améliorer les stocks de matière organique des sols de 4 pour mille par an. Une telle augmentation permettrait, via la séquestration de carbone organique dans les sols, de compenser l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre de la planète.



L'initiative, présentée fin 2015 lors de la COP21 à Paris, a entraîné la création d'un groupe de travail international sur le sujet, rassemblant des organismes de recherche, des états et des collectivités, des entreprises privées et autres organisations professionnelles. Le but de ce groupe de travail est de faire connaître ou de mettre en place des actions concrètes sur l'amélioration du stockage de carbone dans les sols, et sur le type de pratiques pour y parvenir.

L'épandage de matières organiques sur des sols agricoles, dont les boues d'épuration, participe au maintien ou à l'amélioration des taux de carbone organique dans les sols. A ce titre, il participe à l'objectif des « 4 pour mille », en permettant le stockage dans le sol de carbone organique.

En novembre 2018, une cinquantaine de chercheurs ont lancé un appel pour "un programme scientifique ambitieux" en faveur de l'initiative "4 pour 1.000" (séquestration du carbone dans les sols). "*Nous, chercheurs et acteurs de terrain (...), affirmons que la préservation et l'augmentation durable du stock du carbone dans les sols est un objectif scientifiquement fondé et techniquement faisable*", interpelle le document. Les signataires réclament "*un effort de recherche théorique, expérimentale et participative*" pour "*éclairer et accompagner l'action*".

4.4.1.5 Le retour au sol et l'économie circulaire

Le modèle économique développé à la suite de la révolution industrielle repose sur l'utilisation importante de ressources naturelles et sur un schéma linéaire : extraction de ressources – production – consommation – déchet.

En s'inspirant des écosystèmes naturels, l'économie circulaire constitue un nouveau modèle économique, basé sur une moindre utilisation des ressources naturelles, et où chaque produit, coproduit ou déchet d'une activité est valorisé ou recyclé dans une autre.

Au-delà des avantages environnementaux, cette démarche d'optimisation représente un gain économique et social, en améliorant l'accès aux ressources au niveau local, et en développant de nouvelles activités.

⁵⁴ STation d'ÉPuration

L'économie circulaire peut s'appliquer aux déchets organiques tels que les boues d'épuration. Ces déchets peuvent être valorisés pour fournir de l'énergie, du gaz, ou de l'électricité, ou servir d'amendements et de fertilisants pour les sols et les cultures. Ainsi, l'Institut de l'Économie Circulaire, regroupant les experts en matière d'économie circulaire, ont intégré la pratique d'épandage des déchets organiques dans leur atelier « Quelles boucles vertueuses pour une alimentation durable ? »

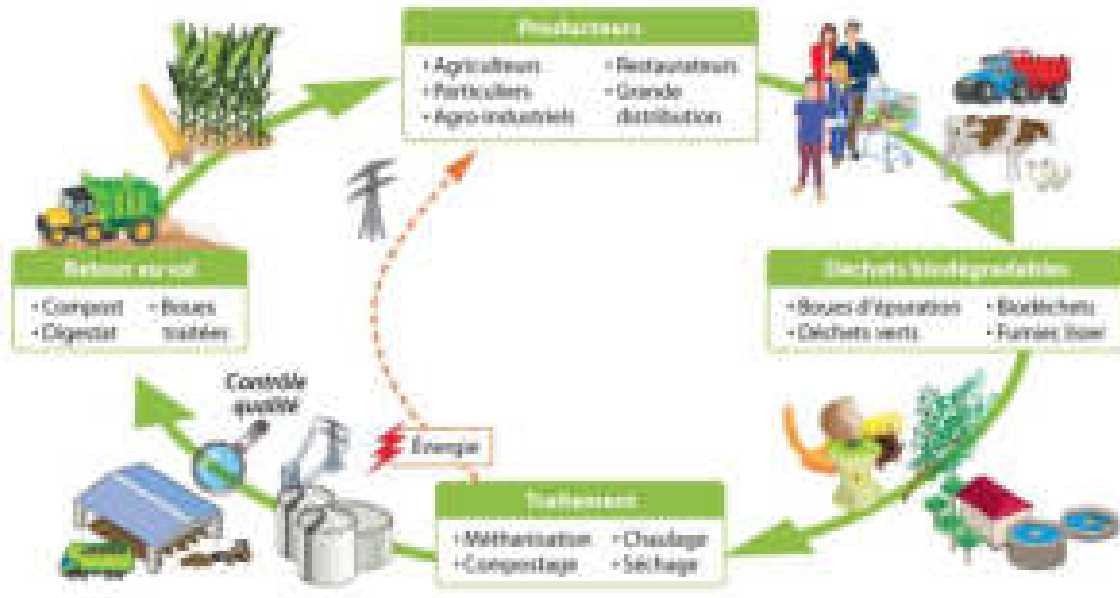


Figure 10: Retour au sol et économie circulaire

(source ; <http://www.retouralaterre.org/>)

En France, l'ADEME a publié en juin 2016 un rapport⁵⁵ présentant l'économie circulaire comme une **opportunité de transition durable des territoires** : « *Il en va du renforcement de leur dynamisme, de leur attractivité et de leur résilience socio-économique, à travers notamment la préservation de l'environnement et de la qualité de vie, le renforcement de la compétitivité des entreprises, le développement de nouvelles activités, la préservation et le dégagement de nouvelles opportunités d'emploi* ».

Elle propose des pistes pour intégrer l'économie circulaire aux documents de planification régionaux suivants :

- **SRDEII** : Schéma Régional de Développement Economique, d'Innovation et d'Internationalisation,
- **PRPGD** : Plans Régionaux de Prévention et de Gestion des Déchets,
- **SRADDET** : Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires.

En avril 2018, le gouvernement a présenté sa feuille de route pour une économie 100 % circulaire. Fruit de plusieurs mois de concertation et d'élaboration, ce document comprend 50 mesures qui ont pour objectif d'inciter à mieux produire, mieux consommer et mieux gérer les déchets. Elle doit également permettre la mobilisation de chacun pour répondre aux objectifs du Plan Climat.

⁵⁵ Auxilia – 2016 – Intégration de l'économie circulaire dans la planification régionale et les démarches territoriales : Synergies, méthodes et recommandations – Synthèse - 8 pages.

Les objectifs globaux sont de :

- réduire la consommation de ressources liée à la consommation française : réduire de 30 % la consommation de ressources par rapport au PIB d'ici à 2030 par rapport à 2010,
- réduire de 50 % les quantités de déchets non dangereux mis en décharge en 2025 par rapport à 2010,
- tendre vers 100 % de plastiques recyclés en 2025,
- réduire les émissions de gaz à effet de serre : économiser l'émission de 8 millions de tonnes de CO2 supplémentaires chaque année grâce au recyclage du plastique,
- créer jusqu'à 300 000 emplois supplémentaires, y compris dans des métiers nouveaux.



Les cibles de cette feuille de route sont les consommateurs et les citoyens, les entreprises, l'Etat et les collectivités.

Les feuilles 24, 36 et 37 encouragent à valoriser les biodéchets de qualité et respectant les réglementations via le secteur agricole. Il faut favoriser l'utilisation de matières fertilisantes issues de ressources renouvelables. Il est également encouragé de renforcer les normes existantes sur les matières fertilisantes issues du recyclage et d'adapter la réglementation pour favoriser l'économie circulaire.

4.4.1.6 Les états généraux sur l'alimentation

Les États généraux de l'alimentation, lancés le 20 juillet 2017 par le Premier ministre s'articulent autour de deux chantiers, le premier consacré à la création et à la répartition de la valeur, le second portant sur une alimentation saine, sûre, durable et accessible à tous.

Quatorze ateliers, dont un atelier transversal, se sont déroulés entre la fin du mois d'août et la fin du mois de novembre 2017.

Les échanges au sein de ces ateliers ont associé l'ensemble des parties prenantes : producteurs, industries agroalimentaires, distributeurs, consommateurs, restauration collective, élus, partenaires sociaux, acteurs de l'économie sociale, solidaire et de la santé, organisations non gouvernementales, associations caritatives et d'aide alimentaire à l'international, banques, assurances ...

« Développer la bio-économie et l'économie circulaire » était l'enjeu de l'atelier 3. Les travaux ont permis de classer les 7 enjeux majeurs :

1. Mobiliser et produire durablement la biomasse pour l'économie circulaire et la bioéconomie :
 - En préservant les sols agricoles (Matière organique, juste rémunération, préserver le foncier),
 - En encourageant les filières productrices de biomasse (interculture...)
 - En encourageant le tri à la source (biodéchets objectif 2025, Schéma Régional de Gestion des Déchets...).
2. Produire des fertilisants à partir de ressources organiques pour réduire la vulnérabilité de l'agriculture avec des fertilisants issus de ressources non-renouvelables :
 - En augmentant la part des fertilisants issus de la ressource organique et diminuer la dépendance vis-à-vis des engrais minéraux communiquer, développer des outils et s'assurer de la cohérence avec les réglementations nationale et européenne,
 - En soutenant dans la prochaine PAC, toutes pratiques agricoles permettant la restitution de la matière organique au sol.

3. Faire du secteur agricole et agroalimentaire, des acteurs-clé de la transition énergétique :
 - En soutenant le développement de la méthanisation agricole,
 - En soutenant les biocarburants.
4. Développer les produits et les emballages bio-sourcés
5. Optimiser la création de valeur par l'organisation des filières et des territoires :
 - En assurant la bioéconomie dans une approche économie circulaire cohérente avec l'ensemble des orientations européennes, des engagements nationaux, et développement
6. Sécuriser les agriculteurs au regard de leur participation aux enjeux nationaux de développement de l'économie circulaire :
 - En garantissant et contrôlant la qualité et l'intérêt agronomique des matières fertilisantes issues du recyclage seuils contaminants et d'impuretés, mise en place de label qualité « MFSC⁵⁶ issues de l'économie circulaire »,...
 - En développant les outils d'aide à la décision (analyse de sol, améliorer les connaissances sur la composition des PRO , leur comportement,...),
 - En relançant les missions déchets,
 - En obtenant le retour de la taxe du fonds de garantie.
7. Développer la connaissance et la formation, favoriser l'innovation

On peut noter que l'agriculteur est triplement concerné par la bioéconomie et l'économie circulaire :

- Producteur de Biomasse consommateur, recycleur d'engrais organique (animal ou végétal), bientôt utilisateur de la « chimie verte » Stockeur de Carbone.

En conclusion, les récentes études portant sur la valorisation agricole des boues ont permis de conclure que l'épandage de boues d'épuration :

- ***présente un intérêt pour les sols de par les apports en matière organique et en éléments fertilisants,***
- ***présente des risques sanitaires inférieurs aux valeurs de référence qui fixent le niveau de risque acceptable,***
- ***est encadré par une réglementation adaptée répondant aux objectifs initiaux de garanties d'intérêt agronomique et d'innocuité des épandages,***
- ***s'intègre dans une logique de développement durable et d'économie circulaire.***

Toutefois, l'ensemble des acteurs est conscient de la nécessité de poursuivre les recherches.

4.4.2 Le principe de précaution

4.4.2.1 Définition et application

4.4.2.1.1 Le principe de précaution dans la loi constitutionnelle française

En France, le principe de précaution est évoqué par la Loi Constitutionnelle n°2005-205 relative à la Charte de l'Environnement, adoptée le 28 février 2005 par le Congrès du Parlement et promulguée le 1^{er} mars 2005 par le Président de la République :

« Lorsque la réalisation d'un dommage, bien qu'incertaine en l'état des connaissances scientifiques, pourrait affecter de manière grave et irréversible l'environnement, les autorités publiques veillent, par application du principe de précaution et dans leurs domaines d'attribution, à la mise en œuvre de

⁵⁶ Matière Fertilisante et Support de Culture

procédures d'évaluation des risques et à l'adoption de mesures provisoires et proportionnées afin de parer à la réalisation du dommage. » Article 5 de la Charte de l'Environnement.

4.4.2.1.2 Principe de précaution et principe d'inaction

Les premières années d'application de la Charte de l'environnement ont confirmé la nécessité de considérer le principe de précaution comme un principe d'action qui doit s'appuyer sur le meilleur état de la connaissance technique et scientifique et conduire à la réalisation de travaux de recherche accrus. La mise en œuvre du principe de précaution doit déclencher des programmes de recherche et les approfondissements nécessaires à l'évaluation des incertitudes existantes⁵⁷.

On distingue le principe de précaution des principes de prudence et de prévention, comme l'indique la figure suivante.



Figure 11: Les types de principes

« 1° **Le principe de précaution**, selon lequel l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable ;

2° **Le principe d'action préventive et de correction**, par priorité à la source, des atteintes à l'environnement, en utilisant les meilleures techniques disponibles à un coût économiquement acceptable ;

3° **Le principe pollueur-payeur**, selon lequel les frais résultants des mesures de prévention, de réduction de la pollution et de lutte contre celle-ci doivent être supportés par le pollueur ;

4° **Le principe selon lequel toute personne a le droit d'accéder aux informations relatives à l'environnement détenues par les autorités publiques ;**

5° **Le principe de participation** en vertu duquel toute personne est informée des projets de décisions publiques ayant une incidence sur l'environnement dans des conditions lui permettant de formuler ses observations, qui sont prises en considération par l'autorité compétente. »

⁵⁷ Source : « Le Principe de précaution : quelques réflexions sur sa mise en œuvre », D.Auverlot, J.Hamelin et J.L.Pujol, n°2013-05, septembre.

4.4.2.1.3 Proposition du Sénat visant à équilibrer le « principe de précaution »

Le 27 mai 2014, le Sénat a voté à une large majorité une proposition de loi constitutionnelle visant « à équilibrer le principe de précaution ». Cette proposition de loi vise à inscrire le « principe de l'innovation » au même niveau que le principe de précaution, pour que ce dernier ne soit plus un frein, mais un soutien à l'innovation et à la recherche, ainsi qu'aux progrès technologique et scientifique.

Une 1^{ère} lecture a été faite à l'Assemblée Nationale le 28 mai 2014.

Le 27 novembre 2014, Monsieur le Député Michel Vaspart attire l'attention de Monsieur le ministre de l'économie, de l'industrie et du numérique sur l'exigence de précaution inscrite dans la Constitution, par le biais de la charte de l'environnement et ses effets potentiels sur notre économie. « *Le principe de précaution est, en effet, souvent compris comme une contrainte rigide, paralysante pour l'activité dans un certain nombre de domaines. Il lui serait reconnaissant de bien vouloir lui indiquer si le Gouvernement réfléchit à en assouplir la définition ou l'application et si tel est le cas, dans quels domaines.* »

Réponse du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie publiée dans le JO Sénat du 02 juillet 2015 :

« [...] *Le principe de précaution doit, en effet, être compris comme un principe d'action s'imposant aux pouvoirs publics et aux autorités administratives, dans leurs domaines de compétence respectifs, et non comme un principe d'abstention en cas de doute scientifique. Face à une incertitude quant à la réalisation d'un dommage grave et irréversible pour l'environnement, les autorités sont tenues de mettre en œuvre des procédures d'évaluation du risque potentiel identifié. Ce principe implique donc la mise en œuvre d'une procédure globale dont le point de départ doit être l'identification et la qualification du risque, notamment par la promotion de la recherche scientifique, de l'innovation et d'une expertise indépendante. [...] Elles doivent évaluer le rapport entre les bénéfices et les risques des mesures de précaution envisagées. [...] Dès lors, le Gouvernement n'envisage pas de rechercher une modification de la définition juridique de ce principe, mais, plutôt, de promouvoir, au sein de l'opinion publique, une bonne compréhension de ce que suppose la mise en œuvre de ce principe d'action.* »

4.4.2.2 Une réglementation guidée par le principe de précaution

Dans un contexte général où le souci de préservation de la santé conduit les pouvoirs publics à prendre sans cesse des mesures plus précises pour prévenir tous les risques potentiels, même les plus infimes, la pratique de l'épandage des boues d'épurations n'échappe pas aux démarches d'analyse et de maîtrise des risques. Aussi, la législation, en place depuis de nombreuses années, a été renforcée avec la mise en place d'une réglementation nationale spécifique, protectrice et sécuritaire :

- Le décret du 08 décembre 1997, recodifié dans le livre II du Code de l'Environnement : titre1-chapitre1-section2-sous-section2 ;
- Son arrêté d'application du 08 janvier 1998.

Cette réglementation impose :

- Le respect des principes d'intérêt agronomique et d'innocuité, et fixe notamment des seuils à respecter, en particulier sur les ETM et les CTO, pour pouvoir valoriser en toute sécurité une boue de station d'épuration en agriculture ;

- Un Suivi et une Auto-surveillance des Épandages (SAE) afin d'avoir un contrôle et une traçabilité de la filière de valorisation agricole. Des documents de suivi (PPE⁵⁸, registre d'épandage et bilan agronomique) sont remis à l'Administration, chaque année.

La filière de valorisation agricole des boues de Seine aval, en répondant aux exigences réglementaires, respecte le principe d'innocuité. Ces boues peuvent donc être épandues en agriculture, sans conséquences pour l'environnement.

La réglementation actuellement en vigueur permet d'assurer la maîtrise des risques liés à l'épandage de boues d'épuration, comme en témoignent les propos évoqués ci-après et ceux de Rémi Chaussod, Directeur de recherche à l'INRA, UMR⁵⁹ Microbiologie et géochimie des sols, et éminent chercheur spécialisé sur ce sujet :

« Au plan réglementaire, ce qu'il faut savoir c'est que la législation actuelle concernant les épandages est basée sur toutes les recherches qui ont été effectuées depuis des dizaines d'années en France, en Europe et dans le monde.

Et donc la législation actuelle est certainement ce que l'on fait de mieux dans ce domaine et les épandages de boues sont certainement l'une des activités agricoles les mieux encadrées à ce niveau-là. Je pense que, même si le risque 0 n'existe pas comme pour toutes les autres pratiques agricoles, les risques sont parfaitement maîtrisés et ce qu'il importe surtout, c'est d'appliquer à la lettre toute la législation avec la rigueur nécessaire ». Propos recueillis par le SYPREA dans son DVD « Recycler les boues en agriculture, un choix raisonné ».

4.4.3 La traçabilité des boues de Seine aval et l'exécution de la filière

La mise en oeuvre de la filière est présentée dans le chapitre 9 de l'Étude préalable.

4.4.3.1 Analyses des boues de Seine aval

Le traitement des boues (digestion, conditionnement thermique (cuisson à 195°C sous 20 bars de pression pendant 45 minutes et déshydratation par filtres presses) a un impact sur leurs propriétés physico-chimiques d'une part, et sur leur composition d'autre part. Les boues de Seine aval sont hygiénisées, stables, solides (au moins 45% de siccité), tiennent bien en tas et fermentent peu.

Comme déjà présenté dans le *chapitre 4.3.1.2 Composition des boues de seine aval*, les boues de Seine aval sont analysées chaque semaine, afin de contrôler leur conformité réglementaire et leur intérêt agronomique. Les analyses sont effectuées d'une part par le laboratoire interne du site Seine aval, dans le cadre de son autocontrôle et des besoins de son exploitation et, d'autre part, par un laboratoire accrédité COFRAC.

L'échantillon soumis à analyse est un échantillon moyen représentatif de la production d'une semaine. Il est constitué du regroupement d'environ 260 prélèvements élémentaires, réalisés lors des débâtissages de chaque filtre presse au cours de la semaine. Les résultats obtenus sont représentatifs des boues produites.

⁵⁸ Programme Prévisionnel d'épandage

⁵⁹ Unité Mixte de Recherche

4.4.3.2 Stockage et traçabilité

Les boues sont gérées par lots regroupant une à deux semaines de production. En attente des résultats d'analyse, chaque lot est transféré vers l'un des 10 cellules de stockage du site. Les casiers permettent une séparation physique des lots, ce qui facilite leur suivi. La capacité de stockage du site est d'environ 35 000 tonnes de boue.

Seules les boues conformes sont évacuées en agriculture : aucun lot de boues destiné à l'épandage direct ne sort de l'usine avant le retour des résultats d'analyse.

4.4.3.3 Les commandes de boue auprès des agriculteurs

L'agriculteur et le technicien du prestataire du SIAAP définissent ensemble, au moment de la commande, la ou les parcelles à épandre en fonction des pratiques de l'exploitation (fertilisation, rotation, assolement) et des contraintes (accessibilité des parcelles...).

Un bon de commande est établi conjointement, reprenant l'ensemble des informations suivantes :

- la liste des parcelles à épandre, leur surface et la succession culturale,
- la période d'épandage prévue et la dose à épandre par parcelle,
- les informations relatives à l'entreposage et à l'épandage (date, accessibilité...),
- les contraintes particulières (dates d'implantation des CIPAN⁶⁰, enfouissement...),
- les conditions de cession (rendu racine gratuit).

4.4.3.4 Evacuation et livraison des boues de Seine aval

Chaque commande de boues de Seine aval prise auprès de l'agriculteur fait l'objet d'un ou plusieurs affrètements. Le déclenchement des affrètements est effectué en fonction de la période de livraison convenue avec l'agriculteur.

La livraison des boues en tête de parcelle s'effectue par transport non dédié, dans des semi-remorques, de type céréalière, équipées obligatoirement d'un système de bâchage. Une benne contient de 25 à 30 tonnes de boues.

Les entreprises de transport affrétées sont originaires ou limitrophes du département dans lequel a lieu la livraison. Elles transportent vers la région parisienne des matériaux, et repartent vers leur département avec des boues destinés à être valorisés. Le choix privilégié d'un transport non dédié permet d'améliorer le bilan environnemental de la filière et évite d'apporter un trafic supplémentaire sur les routes.

Arrivés sur le site, les camions sont pesés à vide puis à charge et le transporteur est destinataire d'un bon de pesée indiquant le poids net de boues transportées.

A chaque démarrage d'un nouvel affrètement, le chauffeur du premier camion se voit remettre : une carte de localisation précise de la parcelle à livrer, une pancarte à déposer sur le tas livré, de manière à informer les riverains de la nature du déchet. Cette pancarte précise l'origine et les caractéristiques des boues et les coordonnées de l'usine. Chaque demande (écrite ou téléphonique) fera l'objet d'une réponse de la part du SIAAP.

⁶⁰ Culture Intermédiaire Piège à Nitrates

Depuis 2011, un outil complémentaire de suivi des livraisons de boues par géolocalisation a été mis en place par le prestataire du SIAAP. Grâce à un logiciel spécialisé et à une balise GPS⁶¹ installée dans la cabine des camions, il est possible de suivre en temps réel la livraison des boues, du départ de l'usine Seine aval jusqu'au dépôt en tête de parcelle.

La procédure de suivi mise en place permet le contrôle de 100% des livraisons

4.4.3.5 Les épandages

Les épandages de boues de Seine aval sont réalisés par des ETA locales et qualifiées. Les ETA retenues respectent le cahier des charges répondant aux exigences du SIAAP. Leur matériel est validé par le SIAAP, via son prestataire. Tout comme les transporteurs, les ETA font l'objet d'une sélection et d'une évaluation annuelle de leurs prestations.

Lors des épandages, les boues entreposées temporairement en tête de parcelle sont reprises, le plus souvent à l'aide d'une pelle ou d'un chargeur, et chargés dans des épandeurs adaptés qui permettent le dosage adéquat des apports : épandeurs à plateaux.

Les chantiers d'épandage sont organisés de façon à limiter les nuisances pour le voisinage (prise en compte des conditions climatiques...). L'enfouissement des boues est réalisé sous 48 h, à moins de 100 m des habitations et dans les plus brefs délais sinon. L'exploitant agricole s'y engage par l'intermédiaire de la convention tripartite signée au titre de l'écoconditionnalité PAC, qui précise les termes du contrat entre le SIAAP, son prestataire chargé du transport et des épandages et l'agriculteur.

Depuis 2011, le SIAAP impose à son prestataire de contrôler 100 % des épandages de boues. Le contrôle des épandages permet de vérifier le respect des consignes d'épandage et la bonne réalisation des chantiers. Tout comme pour le suivi des livraisons, une procédure de suivi et de contrôle des épandages a donc été mise en place. Les moyens de contrôle sont adaptés selon le niveau de sensibilité de la parcelle, défini préalablement en fonction de critères environnementaux (présence de cours d'eau, d'habitations,...) et de l'historique de la parcelle (existence de réclamations par le passé).

De plus, le prestataire du SIAAP déploie progressivement un système de suivi des épandages par GPS, permettant au conducteur de l'épandeur de visualiser directement sa localisation par rapport aux zones inaptes, sur un écran disposé dans sa cabine. En Eure-et-Loir, 100% des parcelles épandues sont suivies par GPS.

La procédure de suivi mise en place permet le contrôle de 100% des épandages

4.4.4 Fonds de garantie

Le « fonds de garantie boues » a été créé dans le cadre de la loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques afin d'indemniser les préjudices qui seraient subis par les exploitants agricoles et les propriétaires des terres agricoles ou forestières, dans les cas où ces terres deviendraient totalement ou partiellement inaptes à la culture suite à un dommage écologique lié à l'épandage de boues d'épuration urbaine ou industrielle. Son principe est repris dans le décret n° 2009-550 du 18 mai 2009 relatif à l'indemnisation des risques liés à l'épandage agricole des boues d'épuration urbaines ou industrielles.

⁶¹ Global Positioning System

Il a été alimenté par une taxe annuelle due par les producteurs de boues en fonction du tonnage de matière sèche produit. Les producteurs de boues sont tenus d'indiquer les quantités de matière sèche produites dans le registre que le code de l'Environnement leur impose de tenir.

Comme toute garantie, l'objectif est de ne pas avoir besoin d'y recourir. Le suivi des filières d'épandage des boues ont permis de ne jamais avoir à y faire appel depuis sa création en 2006.

Le SIAAP a contribué chaque année à l'alimentation de ce fonds.

Suite à la parution de la loi de finance 2017, la taxe annuelle qui abonde le fonds de garantie est supprimée depuis 1er janvier 2017. Le fonds de garantie est toujours existant.

4.4.5 Pollution liée à des épandages de boues ?

A ce jour, aucun accident environnemental lié à des épandages de boues réalisés dans le respect de la réglementation n'a été relevé en France. Toutefois, certaines pratiques, comparées à tort avec l'épandage raisonné pratiqué aujourd'hui portent encore préjudice à l'image de la filière de valorisation agricole des boues de stations d'épuration.

4.5 Thème 5 : les atteintes à la santé

Les éléments ci-après permettent de compléter le dossier de demande d'autorisation afin de répondre à certaines observations formulées pendant l'enquête.

Les observations reprises dans le thème 5 : "les atteintes à la santé" par la commission d'enquête évoquent différents sujets comme :

- Les risques liés à la présence de microorganismes pathogènes dans les boues
- L'impact des épandages sur la santé animal
- l'origine du calendrier d'épandage
- Les risques liés à la présence de pesticide, médicaments...

4.5.1 L'hygiénisation des boues

Les boues d'épuration contiennent des micro-organismes vivants en provenance des eaux usées et des processus de traitement. Seule une infime partie d'entre eux sont pathogènes. Les micro-organismes que l'on retrouve sont les :

- Micro-organismes phytopathogènes,
- Anthropo-zoopathogènes et zoopathogènes qui présentent un risque, c'est pourquoi la surveillance de la qualité des boues est nécessaire, que des précautions lors des épandages sont prises et qu'il est mis en place des traitements d'hygiénisation des boues (digestion, chaulage, compostage...).

Il existe 5 types de pathogènes :

- les métazoaires (helminthes, vers...),
- les protozoaires,
- les bactéries,
- les virus,
- les parasites.

La figure suivante illustre l'ensemble des pathogènes qui a pu être détecté dans des boues urbaines (étude sur des boues non-traitées et traitées menée par la Commission Européenne en 2001).

BACTERIES	VIRES	HELMINTHES	PROTOZOAIRES	CHAMPIGNONS	LEVURES
Bacterioides spp.	Poliovirus	Ascaris lumbricoides	Garde-robe	Aspergillus spp.	Candides spp.
Escherichia coli	Échovirus	Trichostrongylus axei	Colibacilles diarrhéiques	Trichosporon oleronense	Trichosporon
Listeria monocytogenes	Échovirus	Hydrocotyle sp.	Streptococcus faecalis	Geotrichum candidum	Cryptosporidium parvum
Campylobacter spp.	Herpesvirus	Taenia saginata	Streptococcus faecalis	Trichosporon spp.	
Clostridium botulinum	Adenovirus	Trichostrongylus axei et sp.	Streptococcus faecalis	Hydrocotyle spp.	
Clostridium perfringens	Herpesvirus	Diphyllobothrium latum	Cryptosporidium parvum		
Shigella spp.	Virus de l'hépatite A, C et E	Stenomoxus granulatus	Streptococcus faecalis		
Myxobolus spp.	Herpesvirus	Aspicterus aculeatus	Yersinia enterocolitica		
Staphylococcus aureus (souches résistantes)	Adenovirus	Ascaris lumbricoides			
Streptococcus pneumoniae	Calicivirus				
Escherichia coli (souches entérohémorragiques)	Coronavirus				
Yersinia enterocolitica	Herpesvirus, sp. calicivirus				
Yersinia enterocolitica	Virus, rotavirus, sp. calicivirus				
Yersinia enterocolitica	Virus, herpès				
Legionella spp.	Poliovirus (A, C, et E)				
Staphylococcus aureus					
Aspergillus spp.					
Trichosporon spp.					

Figure 12: Agents pathogènes des boues d'épuration urbaines

Source : Evaluation des risques sanitaires des filières d'épandage des boues de stations d'épuration – ADEME/SYPREA/FP2E/INERIS (octobre 2007)

P.A. Rusin (2003) a étudié la contamination de boues traitées en *Staphylococcus aureus*. Dans les 23 échantillons testés provenant de traitements de boues différents (digestion anaérobie mésophile et stabilisation mésophile avec ou sans chaulage, séchage, compostage, digestion thermophile), aucune bactérie n'a été détectée (<30NPP⁶²/100g).

L'hygiénisation des boues permet la réduction de la contamination par les agents pathogènes, et le blocage de tout re-développement des agents pathogènes. On dit que l'hygiénisation est totale si les agents pathogènes indicateurs d'une éventuelle contamination ne sont pas détectés aux seuils définis par la réglementation. L'article 16 de l'arrêté du 8 janvier 1998 est précis à ce sujet :

- le nombre de salmonelles doit être inférieur à 8 pour 10g de matière sèche,
- la concentration d'entérovirus, inférieure à 3/10g MS,
- les œufs d'helminthes pathogènes viables à maximum 3/10 g MS,
- La réalisation d'une analyse de caractérisation des coliformes thermotolérants.

Les coliformes thermotolérants (résistants aux traitements thermiques) sont analysés tous les quinze jours pendant la période d'épandage pour démontrer l'absence de recontamination.

De plus les boues d'épuration ne constituent pas un milieu favorable à la survie des micro-organismes pathogènes (traitement du process, pH, humidité,..). Au cours du stockage et de l'épandage, leur destruction est accélérée. Les effets du climat (température, rayonnement solaire, humidité) et les effets du sol (compétition avec d'autres micro-organismes, conditions physico-chimiques) jouent un rôle important également dans la dégradation des éléments pathogènes. L'enfouissement peut ralentir leur disparition et leur perte de viabilité.

⁶² Nombre le Plus Probable

Trois techniques de traitement pour l'hygiénisation sont disponibles : biologique (compostage, pasteurisation, digestion), chimique (chaulage, stabilisation aux sels de nitrite) et physique (traitement thermique en sécheur à 90°C).

La digestion anaérobie (cas des boues de Seine aval) permet d'hygiéniser que partiellement les boues (traitement à moins de 40°C). Si les germes fécaux sont éliminés, les entérovirus sont inactivés et les œufs d'helminthes peuvent subsister. Complétée par un traitement thermique, un effet complémentaire hygiénisant au niveau du produit digéré a lieu avec une montée en température et en pression. En effet, les boues de Seine aval sont conditionnées thermiquement (cuisson à 195°C sous une pression de 20 bars pendant 45 minutes). La complémentarité entre les techniques est une garantie d'une meilleure maîtrise de la réduction des germes pathogènes.

Suite à l'épandage sur les sols agricoles, les pathogènes des boues d'épuration peuvent survivre, selon les conditions environnementales, dans les sols et se retrouver potentiellement dans différents milieux environnementaux (sol, eau, air) selon les pratiques d'épandage et les conditions climatiques (vent, pluie).

Plusieurs facteurs interagissent de manière complexe sur la survie des agents pathogènes dans les sols. La vie microbienne naturelle permet une mise en compétition avec les pathogènes des boues qui sont naturellement éliminés dans les sols. Les principaux facteurs agissant sur la durée de vie des pathogènes sont présentés dans le tableau suivant (Wray Bvm 1975 ; Smith 1996 ; Etude Commission Européenne – EC 2001).

Paramètre	Impact durée de survie			
	Virus	Bactéries	Protozoaires	Helminthes
∇ Température	-	-	-	-
∇ Ensoleillement	-	-	-	-
∇ Humidité	+	+	+	+
∇ Dessèchement	-	-	-	-
∇ Contenu argileux du sol	+	+	?	+
∇ Capacité de rétention en eau du sol	?	+	+	+
pH 6-8	?	+	?	?
∇ Disponibilité de nutriments	/	+	?	?
∇ Présence de substances toxiques antimicrobiennes	/	-	/	/
∇ Microflore sol	?	-	+	?
∇ Couverture végétale	?	+	+	+
∇ Profondeur d'application	+	+	+	+

- : diminue la survie + : augmente la survie ? : effet inconnu / : sans objet

Figure 13: Facteurs influençant la durée de vie des agents pathogènes dans le sol

Source : *Evaluation des risques sanitaires des filières d'épandage des boues de stations d'épuration – ADEME/SYPREA/FP2E/INERIS (octobre 2007)*

La survie dans les sols dépend donc de nombreux paramètres liés aux caractéristiques de la boue, aux conditions d'épandage et aux conditions climatiques. Globalement, les virus et les bactéries ont des durées de vie assez courtes dans les sols tandis que les helminthes peuvent survivre plusieurs mois après épandage. Cependant, l'action de nombreux facteurs défavorables en terre labourable limite la survie et la présence dans l'horizon superficiel à une durée comprise entre 30 et 90 jours (Gaspard 1995).

Après épandage, la majorité des pathogènes s'accumulent dans les premiers centimètres du sol. L'eau constitue la principale voie de dissémination des pathogènes dans l'environnement. La contamination des eaux souterraines est peu probable aux vues des conditions actuelles d'épandage (définition du périmètre d'épandage en dehors des zones de protection rapprochée ou immédiate de captage d'eau potable et maîtrise de la dose d'épandage). La contamination des eaux de surface peut théoriquement se produire par ruissellement/lessivage lors d'évènements pluvieux après épandage. Le ruissellement est généralement très limité sur des résidus de cultures, de plus l'épandage est réalisé à plus de 35 m des cours d'eau, points d'eau.

La contamination de l'air suite à un épandage n'est possible que lors de l'utilisation de rampes équipées de buses d'aspersion pour les boues liquides en conditions ventées, car en France, l'épandage est interdit à l'aide de dispositif d'aérodéposition qui produisent des brouillards fins.

Enfin la survie des pathogènes sur les végétaux (cas d'épandage sur prairie) est souvent inférieure à 1 mois du fait de l'inactivation par le dessèchement et la lumière. De plus aucune étude publiée ne montre la transmission à l'homme de pathogènes venant d'animaux ayant pâture sur une parcelle épandue. La cellule nationale de veille sanitaire vétérinaire n'a jamais établi de lien direct entre l'épandage des boues et des accidents pathologiques depuis le début de son fonctionnement en 2011.

Les sols agricoles sur lesquels se pratiquent les épandages peuvent également être concernés par l'épandage des effluents d'élevage. Ainsi, les déjections d'animaux domestiques ou sauvages, porteur d'organismes pathogènes, constituent un bruit de fond particulièrement important des milieux environnementaux (sols et eaux de surface).

Cas des boues de Seine aval

Le conditionnement thermique est l'une des étapes de traitement des boues de Seine aval, au cours de laquelle elles sont admises dans un cuiseur puis portées à au moins 195°C, sous une pression de 20 bars, pendant 45 minutes. Cette étape permet une meilleure filtrabilité des boues, qui obtiennent alors également leur caractère hygiénisé.

Le caractère hygiénisé des boues est reconnu lorsque les deux conditions suivantes sont simultanément remplies (issues de l'arrêté du 08/01/1998) :

1. Il est prouvé que les boues, à la sortie du traitement en assurant l'hygiénisation, respectent des concentrations limites pour 3 types de micro-organismes pathogènes. La concentration en coliformes thermo-tolérants (non pathogènes, mais indicateurs d'une contamination), est également analysée. Cette valeur sert de référence (sans qu'il y ait de valeur limite) pour les mesures de la condition 2.
2. Une surveillance continue (1 analyse tous les 15 jours, en période d'épandage) des concentrations en coliformes thermo-tolérants (marqueurs de la qualité de la boue) est mise en place. Aucune boue n'est évacuée en tête de parcelle avant le retour conforme des résultats d'analyse.

Afin d'évaluer l'efficacité hygiénisante de la digestion et du conditionnement thermique des boues, le SIAAP a mis en place un suivi analytique depuis 1999 :

- comme l'exige la condition 1, l'hygiénisation a été contrôlée par des analyses complètes des germes pathogènes visés par l'arrêté du 8 janvier 1998 lors de la caractérisation initiale du procédé de traitement des boues,
- la condition 2 est vérifiée par la réalisation d'une analyse de coliformes thermotolérants tous les 15 jours des boues entreposées en tête de parcelle, durant la période d'épandage allant de

mi-juillet à mi-octobre. Les concentrations mesurées en routine en sortie de traitement sont interprétées en référence à celle obtenue lors de la caractérisation initiale, et doivent démontrer l'absence de recontamination : si les teneurs sont supérieures à l'initiale, la boue perd le statut de boue hygiénisée. Pour le recouvrer, il faut procéder à nouveau aux analyses de la condition .

L'arrêté du 8 janvier 1998 n'impose pas aux boues d'être hygiénisées pour pouvoir être épandues. L'hygiénisation est donc un processus volontaire permettant de dépasser les exigences minimales de la réglementation. Le statut de boues hygiénisées influe sur le stockage des boues en tête de parcelle, en permettant notamment leur livraison toute l'année, et sur l'épandage (pas de distance d'isolement par rapport aux habitations et zones de loisirs).

Les résultats sont présentés ci-après :

Tableau 9: Vérification de l'hygiénisation des boues thermiques

	Analyses de boues en 2018				Valeurs limites Arrêté du 08/01/98
	Semaine 6	Semaine 18	Semaine 31	Semaine 46	
Salmonelles (NPP */10g MS)	< 8	< 8	< 8	< 3	< 8 NPP/10 gMS
Entérovirus (NPPUC**/10g MS)	Absence	Absence	Absence	Absence	< 3 NPPUC/10 gMS
Œufs d'helminthes viables (nbre d'œufs /10g MS)	Absence	Absence	Absence	Absence	< 3/10 gMS

	Analyses de boues en 2018		Valeurs limites Arrêté du 08/01/98
	Sortie filtre-presse (13 analyses)	En-tête de parcelle au plus près des épandages (15 analyses)	
Coliformes thermo-tolérants (nbre d'individus /g MS)	< 3	Résultat compris entre < 1 et 3 000***	-

* NPP : Nombre le Plus Probable

** NPPUC : Nombre le Plus Probable d'Unités Cytoplasmiques

*** Selon le référentiel du laboratoire d'analyse, un lot est considéré comme recontaminé si la teneur dépasse 6⁶ coliformes thermotolérants/gMS.

Les boues de Seine aval présentent des teneurs négligeables en germes pathogènes et une absence de recontamination.

Les boues de Seine aval répondent donc aux objectifs du Grenelle de l'environnement pour la valorisation des déchets organiques, à savoir d' "assurer la qualité sanitaire et environnementale de la matière organique destinée à une valorisation agronomique pour permettre une valorisation effective ".

L'arrêté du 8 janvier 1998 n'impose pas aux boues d'être hygiénisées pour pouvoir être épandues. L'hygiénisation est donc un processus volontaire permettant de dépasser les exigences minimales de la réglementation. **Le statut de boues hygiénisées influe sur le stockage des boues en tête de parcelle, leur livraison toute l'année, et en permettant notamment l'épandage** sans distance d'isolement par rapport aux habitations et zones de loisirs.

4.5.2 Impact des épandages sur la santé humaine

Les micro-organismes jouent un rôle essentiel dans les processus d'épuration, aussi bien en station que dans le sol. Il en existe une très grande variété mais seule une infime partie peut être pathogène. On les classe parmi les virus, les bactéries, les protozoaires, les champignons et les helminthes. Les procédés de traitement primaires des eaux usées résiduaires concentrent les différents microorganismes avec les boues. Ainsi, les eaux usées sont moins concentrées en agents pathogènes que les boues brutes primaires. Cependant les traitements appliqués aux boues des stations d'épuration permettent une élimination importante des microorganismes. A noter que l'hygiénisation (digestion, chaulage et conditionnement thermique pratiqués uniquement par les grosses stations) des boues permet de réduire les concentrations d'agents pathogènes présents dans les boues.

Les agents pathogènes sont présents dans les produits organiques bruts n'ayant pas subi de traitement tel que le compostage (ex : lisier, déchets verts broyés, boues urbaines, etc.). Une fois au sol, les chances de survie de ces organismes sont toutefois considérablement amoindries par les conditions du milieu qui leurs sont défavorables et par la concurrence des micro-organismes du sol.

Une étude des risques sanitaires a été réalisée en 2005 (Cf. Etude d'impact 4.1.7.2. Evaluation des risques sanitaires) par un groupe de travail réunissant l'INERIS, l'ADEME, le SYPREA et le SPDE (Syndicat des Producteurs et Distributeurs d'Eau) : « Evaluation des risques sanitaires des filières d'épandage des boues de station d'épuration ». La méthode a pris en compte différentes voies d'exposition (ingestion, inhalation, contact et chaîne alimentaire) et a été appliquée sur 3 périodes d'épandages : 10, 30 et 70 ans (avec un épandage tous les 3 ans).

Le schéma conceptuel d'exposition suivant récapitule l'ensemble des voies possibles de transfert et d'exposition pour les populations cibles d'un plan d'épandage spécifique.

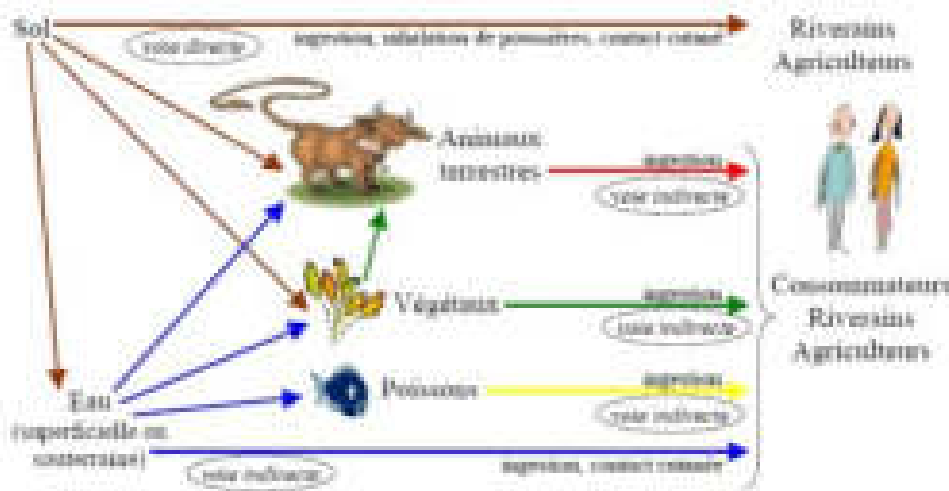


Figure 12: Schéma conceptuel global d'exposition

Les conclusions de cette étude montrent que les risques présentent des niveaux usuellement considérés comme acceptables, traduisant l'absence de répercussion chronique sur les populations.

Cette étude a permis également de faire les constats suivants :

- Depuis plus de 30 ans que l'on pratique l'épandage agricole de boues d'épuration des eaux usées en France, l'épandage de boues n'a jamais été remis en cause lors des enquêtes sur les épidémies d'origine environnementale.

- Des études ont permis de détecter et quantifier la présence de certains agents pathogènes dans les boues d'épuration et d'appliquer des traitements efficaces.
- Sur les parcelles épandues on observe, la plupart du temps, une forte décroissance des pathogènes au bout de 2 mois du fait des conditions défavorables à leur survie (dessiccation, température, compétition naturelle de l'écologie microbienne).
- Dans les zones agricoles, certains agents pathogènes sont déjà présents dans l'environnement au moment des épandages (exploitation d'élevage, animaux domestiques ou sauvages).

La réglementation mise en place sur les prescriptions des conditions d'épandage, les délais et les distances d'épandage, vise à réduire les risques. De plus, le SIAAP a fait le choix d'épandre uniquement sur grandes cultures.

4.5.3 Impact des épandages sur la santé animale

Les épandages n'ont lieu que sur des parcelles labourables et non sur des prairies. Aucun risque n'est à prévoir vis-à-vis des troupeaux concernant une ingestion directe des boues.

Les boues étant enfouies dans les champs, après l'épandage, le risque d'ingestion par les animaux est donc limité.

Comme présenté dans le chapitre 2.1, des tests sur l'écotoxicité des boues de station d'épuration ont été réalisés en 2010 sur des daphnies, des algues douces et des vers de terre. Les résultats de ces tests montrent que les boues de station d'épuration n'ont aucune toxicité pour ces écosystèmes.

Enfin, l'ensemble des sites ou zones remarquables, faisant l'objet d'une attention faunistique particulière, a été pris en compte lors de la définition des aptitudes à l'épandage (Cf. Chapitre 2.2).

Pour vérifier l'innocuité des pratiques d'épandages des boues, une cellule de veille sanitaire vétérinaire des épandages a été mise en place dès 1986 et a fonctionné entre 1997 et 2007, puis de nouveau à partir de septembre 2014, dans le cadre d'un partenariat entre des écoles vétérinaires et l'ADEME.

Cette cellule utilise le réseau des centres anti-poisons des écoles vétérinaires pour recevoir les déclarations de cas de pathologies animales potentiellement reliées à un épandage de boues.

Chaque année, le comité de pilotage de la cellule, réunissant les écoles vétérinaires, l'ADEME et des institutions publiques et privées (MEDDTL, SYPREA, missions déchets des chambres d'agriculture, DDSV⁶³) dresse le bilan des cas recensés. A ce jour, l'épandage de boues n'a jamais été mis en cause dans une maladie déclarée sur des animaux domestiques.

Les risques vis-à-vis de la santé animale sont très limités suite à l'épandage et au stockage des boues de station d'épuration.

4.5.4 Le calendrier d'épandage

La partie traitant du calendrier d'épandage à respecter est présentée dans le chapitre 4.10.2.2 La directives nitrates et ses programmes d'action du thème 10 : "L'aptitude des sols".

4.5.5 Les risques liés à la présence de substances indésirables

Les risques liés à la présence de substances indésirables (éléments-traces, résidus médicamenteux, pesticides...) sont détaillés dans le chapitre 4.3.1. *La composition des boues de Seine aval* du thème 3.

⁶³ Direction Départementale des Services Vétérinaires

4.6 Thème 6 : Les principales nuisances constatées

Les éléments ci-après permettent de compléter le dossier de demande d'autorisation afin de répondre à certaines observations formulées pendant l'enquête.

Les observations reprises dans le thème 6: "les principales nuisances constatées" par la commission d'enquête évoquent différents sujets comme :

- Les nuisances liées au transport des boues
- Les nuisances liées à la présence des boues : olfactives, qualité de vie...

4.6.1 Les nuisances liées au transport des boues

4.6.1.1 Une logistique maîtrisée

La logistique de livraisons (périodes et lieux) est maîtrisée par le prestataire du SIAAP pour la valorisation agricole des boues. Celui-ci établit le planning hebdomadaire de livraison et veille à son respect, en fonction des conditions climatiques.

L'acheminement des boues est réalisé par camions de type semi-remorque d'une capacité d'environ 30 tonnes. Ces camions sont normés Euro IV⁶⁴, V ou VI, ce qui limite la pollution atmosphérique due au transport routier.

Les camions sont bâchés pendant le transport des boues, afin d'éviter les nuisances olfactives.

Les chauffeurs utilisent préférentiellement les grands axes, puis des chemins agricoles, si nécessaire, pour accéder aux lieux de livraison. Lorsque cela est possible, ils évitent de traverser les bourgs. Ils sont également sensibilisés au respect de la propreté et de l'état des voiries et chemins empruntés. Le SIAAP et son prestataire se tiennent à la disposition des mairies, notamment lors des réunions de secteur annuelles, pour établir et valider des trajets à éviter ou à privilégier.



Au départ de l'usine Seine aval et selon les saisons, en moyenne 8 camions de boues thermiques partent de l'usine chaque jour en direction des lieux de livraison, localisés dans les départements autorisés, et vers les sites de compostage. Concernant les livraisons pour la valorisation agricole directe, le nombre de camions livrés est dépendant :

- de l'accessibilité des parcelles agricoles, notamment liée aux conditions climatiques,
- des mesures imposées par l'arrêté préfectoral de chaque département,
- de la disponibilité des transporteurs.

⁶⁴ Normes européennes d'émission qui fixent les quantités maximale de rejets polluants pour les véhicules roulants. 6 normes existent à l'heure actuelle selon la date de mise en service du véhicule et le type de moteur.

Pour la campagne d'épandage de 2018, de 1 à 5 camions par jour ont effectué des livraisons dans le département de L'Eure-et-Loir. 5 478,64 tMB (8 % des quantités totales livrées) de boues de Seine aval ont été livrées en Eure-et-Loir pour la campagne 2018.

Comme précisé dans le chapitre 4.4.3.4 *Evacuation et livraison des boues de Seine aval* du thème 4 "Le recul d'expérience et le principe de précaution", 100% des livraisons sont contrôlées par le prestataire du SIAAP.

4.6.1.2 Responsabilité en cas de dégradation

En cas d'erreur de livraison ou d'incident, le SIAAP, via son prestataire, s'engage conformément au décret n° 2007-1467 du 12 octobre 2007, à procéder à la reprise des boues et à leur déplacement, et s'assure de la propreté du lieu après reprise dans les meilleurs délais.

D'autre part, en cas de dégradation des chemins, liés exclusivement au passage des camions de boues de Seine aval, le prestataire du SIAAP, dans le cadre de ses obligations contractuelles avec le SIAAP, s'engage à prendre en charge la remise en état des chemins.

4.6.2 Les nuisances liées aux odeurs des boues

Le traitement spécifique des boues sur l'usine Seine aval (digestion et conditionnement thermique) permet l'obtention de boues sèches, stabilisées et hygiénisées. Elles sont donc peu fermentescibles en comparaison à d'autres types de boues ou de produits organiques (fiente de volaille, fumier de bovins, compost d'ordures ménagères, ...) et génèrent donc peu de nuisances olfactives.

Une odeur peut toutefois se dégager au moment des livraisons et des épandages. Les épandages étant réalisés après moisson, durant la période estivale, les acteurs de la filière font preuve d'une grande vigilance sur les conditions d'épandage (vents, ...) pour limiter l'impact odeurs, alors que les riverains sont justement en extérieur.

D'autre part, des mesures supplémentaires sont prises afin de limiter les désagréments olfactifs :

- une distance d'au moins 100 m est respectée entre les lieux d'entreposage des boues de Seine aval et les habitations,
- les transporteurs ont l'obligation de bâcher les camions au départ de l'usine, consigne vérifiée par le prestataire du SIAAP,
- les boues épandues à moins de 100 m des habitations sont enfouies dans les 48 h par l'agriculteur,
- les boues de Seine aval ne sont pas épandues le week-end et les jours fériés,
- les conditions météorologiques sont prises en compte : les épandages n'ont pas lieu par période de fort vent.

Depuis plus de 10 ans, des questionnaires sont envoyés annuellement aux agriculteurs-utilisateurs afin d'évaluer leur satisfaction sur plusieurs aspects de la filière de valorisation agricole (valeur agronomique des boues, respect du lieu de livraison, odeurs, ...). Ces questionnaires demandent notamment si des problèmes d'odeurs ont été révélés au moment du stockage, des livraisons et/ou des épandages ou si l'agriculteur a été destinataire de remarques de la part de riverains, par exemple.

Ces deux dernières années, le taux de plaintes auprès des agriculteurs du périmètre d'épandage de l'Eure-et-Loir concernant les odeurs se situe entre 2 et 3%.

Les riverains peuvent faire savoir qu'ils ont constaté des odeurs en se rapprochant de la DDT, du SIAAP ou de son prestataire. A cet effet, des panonceaux sont plantés sur les tas stockés en tête de parcelle, indiquant les coordonnées du SIAAP et de son prestataire.

4.6.3 Les nuisances liées à la présence des boues

Sur les registres d'enquête, des interrogations sur la qualité du cadre de vie ont pu être notées. Dans un milieu rural, le cadre de vie est lié au le type de milieu (ici rural), au paysage, au tourisme et à l'urbanisme.

L'activité d'épandage est une pratique agricole intégrée au milieu rural qui se substitue à l'utilisation d'un engrais de synthèse. De plus le recyclage agricole et le retour au sol de la matière organique sont encouragés par la Directive cadre Européenne sur les déchets du 19 novembre 2008, l'arrêté du 21 juillet 2015 relatif au système d'assainissement qui précise la hiérarchie des modes de traitement à privilégier (cf. figure 15 du *chapitre 4.8.4 Traitement par enfouissement en ISDND*) ainsi que par le PDEDMA d'Eure-et-Loir (cf. *chapitre 4.1.3 Mutualisation des déchets* du thème 1).

4.7 Thème 7 : Les incidents sur la station d'Achères et le devenir des boues

L'usine Seine aval a dû faire face à plusieurs incidents industriels au cours des deux dernières années. Tout incident est porté à la connaissance des autorités administratives dont la DRIEE et le BARPI. Ils sont accessibles à tous sur le site internet du ministère de l'environnement (www.aria.developpement-durable.gouv.fr)

Le site a subi 2 incendies importants en 2 ans.

Celui du 13 Février 2018 sur le bâtiment des filtre-presse A4 a entraîné une baisse importante de la production de boues déshydratées destinées à l'épandage direct. Il n'a toutefois eu aucune conséquence sur la qualité des boues qui sont actuellement envoyées en épandage direct car issues de la 2e ligne de production (non impactée). Les boues n'ayant pu être traitées par la filière classique ont été déshydratées par centrifugeuses mobiles mises en place suite à l'incendie et dirigées vers la filière de compostage dans le respect de la réglementation en vigueur.

L'impact sur la filière d'épandage des boues est essentiellement sur le tonnage valorisé. Pour la campagne d'épandage 2019, suite à l'incendie d'une partie des filtres-presses, les quantités de boues mises à disposition des agriculteurs ont été réduites à 36 000 tonnes de matière brute environ au lieu de 90 000 tonnes habituellement. Pour les campagnes suivantes, un porter à connaissance pour valoriser aussi des boues thermiques centrifugées par unités mobiles, a été déposé aux DDT des 13 départements concernées par l'épandage des boues de Seine aval.

L'incendie du 3 juillet 2019 sur l'unité de clarifloculation a eu un impact direct sur la capacité de traitement des eaux de l'usine SIAAP d'Achères. Le SIAAP a dû réorganiser la répartition des flux d'eau usées de l'agglomération parisienne entre ses différentes usines. Le SIAAP s'est engagé auprès des autorités administratives à traiter sur le site Seine Aval 17 m³/s tout temps. A ce jour, la qualité intrinsèque des boues n'a pas évolué. Une légère diminution de la quantité de phosphore dans les boues de Seine aval peut être observée du fait du non fonctionnement de l'atelier de clarifloculation qui capte le phosphore des eaux à rejeter dans le milieu naturel (déphosphatation). Un suivi hebdomadaire est mis en place sur les boues de Seine aval permettant ainsi de garantir l'innocuité des boues avant épandage et d'affiner la dose d'épandage.

4.8 Thème 8 : Les filières alternatives

Les éléments ci-après permettent de compléter le dossier de demande d'autorisation afin de répondre à certaines observations formulées pendant l'enquête.

Les observations reprises dans le thème 8 : "Les filières alternatives" par la commission d'enquête évoquent l'utilisation d'autres filières pour la valorisation ou l'élimination des boues de Seine aval (incinération, production d'électricité...).

Il existe aujourd'hui 2 filières principales de traitement pour les boues résiduaire issues du traitement des eaux usées en France :

- la valorisation agricole par épandage agricole direct ou compostage (environ 76%).
- la valorisation énergétique : incinération (environ 18%),

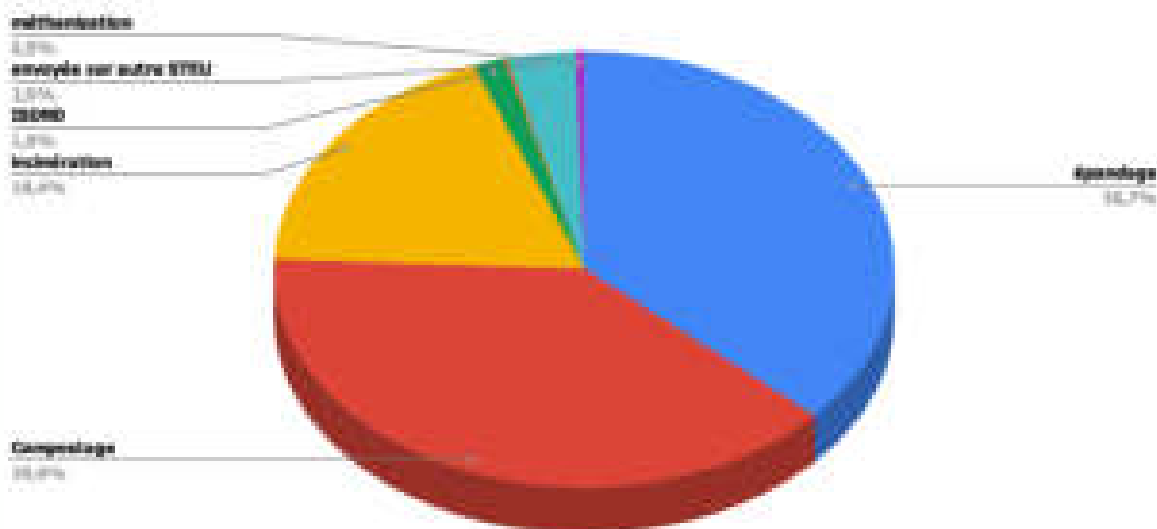


Figure 14: Répartition des filières de valorisation en France en 2017

Source : <http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/>

La filière de mise en Installation de Stockage de Déchet Non Dangereux (ISDND) des boues de station d'épuration est activée uniquement dans le cas de boues non conformes à la valorisation agricole.

4.8.1 Valorisation agricole par épandage agricole direct ou par compostage

Dans un objectif de développement durable et de réutilisation d'éléments valorisables, le SIAAP a fait le choix de privilégier la filière de valorisation agricole pour sa filière de traitement des boues :

- elle favorise le retour au sol, et s'inscrit dans le cadre d'une filière respectueuse de l'environnement,
- elle est en adéquation avec le PDEDMA d'Eure-et-Loir, en favorisant la valorisation de matière et en limitant l'enfouissement des déchets,
- elle permet de préserver les ressources minérales épuisables : les boues étant utilisées comme substitut aux engrais chimiques.

La figure suivante présente les différentes logiques de valorisation agricole des boues : entre logique déchet (traçabilité à la parcelle) et logique produit (respect d'une norme pour le compost de boues urbaines, exigence de qualité plus stricte sur le produit).

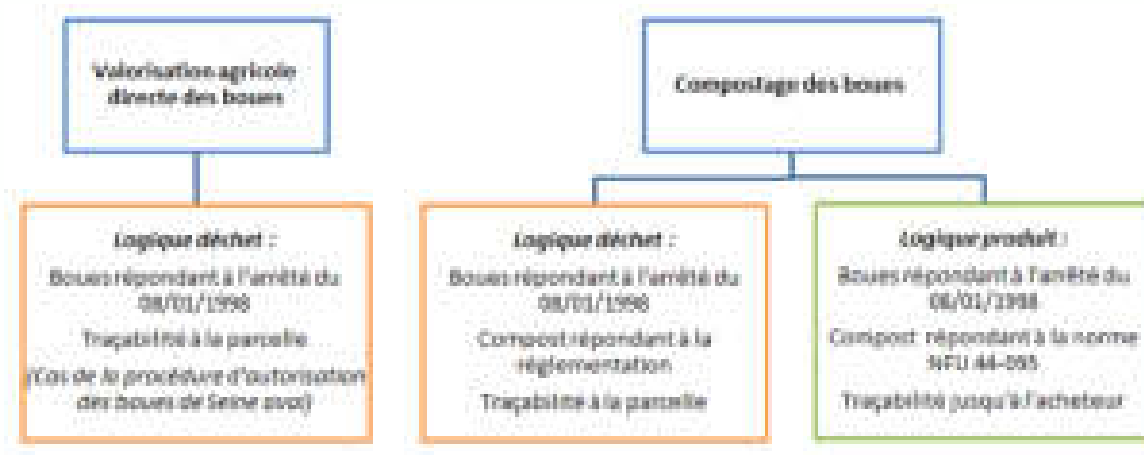


Figure 14: Logique de valorisation des boues

4.8.2 Valorisation par incinération

Grâce au système de récupération de chaleur, la solution de l'incinération devient écologiquement valable. Elle reste toutefois économiquement plus élevée que la valorisation agricole. En effet, l'incinération doit se doter de coûteux systèmes de traitement des fumées pour respecter les normes de rejet.

De plus, les cendres produites au cours de ce traitement, doivent être mises en décharge. Pour les 90 000 tonnes de boues cuites produites annuellement en moyenne par l'usine Seine aval, ce traitement engendrerait de l'ordre de 18 000 tonnes de cendres qui ne peuvent être valorisées.

4.8.3 Valorisation par méthanisation

Un des traitements des boues de Seine aval consiste en une digestion en absence d'oxygène. Il s'agit du principe de la méthanisation.

L'envoi des boues en filière de méthanisation consisterait à les méthaniser une seconde fois. Les boues seraient co-digérées avec d'autres matières fermentescibles, tels que les effluents d'élevage, les biodéchets et les résidus d'industries agroalimentaires.

Le résultat de cette méthanisation est la production :

- d'un biogaz composé essentiellement de méthane valorisable sous forme d'énergie ;
- et d'un amendement équilibré appelé « digestat » valorisable par retour au sol en épandage agricole.

4.8.4 Traitement par enfouissement en ISDND

Les ISDND sont des installations classées pour la protection de l'environnement et sont soumises à autorisation préfectorale. Cette autorisation précise, entre autre, les capacités maximales et annuelles de l'installation, la durée de l'exploitation et les superficies de l'installation de la zone à exploiter et les prescriptions techniques requises.

« L'amélioration de la prise en charge des déchets fermentescibles pour les « détourner » de l'enfouissement (compostage individuel, valorisation par épandage direct, collecte sélective de la fraction fermentescible) constitue un enjeu important en matière de protection de l'environnement. C'est une des mesures du Grenelle de l'Environnement susceptible d'impacter la réglementation sur les installations de stockage des déchets. » (Source : www.2.ademe.fr, consultation du 14/01/2014).

Les boues ne constituent pas un déchet "ultime" puisqu'elles sont valorisables. Un débouché, autre que la mise en ISDND, est donc à favoriser, conformément à la directive cadre Européenne sur les déchets du 19 novembre 2008 et l'arrêté du 21 juillet 2015 relatif au système d'assainissement qui précise la hiérarchie des modes de traitement à privilégier.



Figure 15: Hiérarchie des modes de traitement

La mise en ISDND reste activable uniquement pour évacuer des boues non conformes à la valorisation agricole selon l'arrêté du 8 janvier 1998.

4.9 Thème 9 : Le refus de certains cahiers des charges, la réglementation européenne et sa pérennité

Les éléments ci-après permettent de compléter le dossier de demande d'autorisation afin de répondre à certaines observations des registres.

Les observations reprises dans le thème 9 : "Le refus de certains cahiers des charges, la réglementation européenne et sa pérennité" par la commission d'enquête évoquent le cahier des charges de certains industriels qui refusent l'utilisation de boue d'épuration.

4.9.1 La position des industries agroalimentaires

Face aux crises sanitaires auxquelles la France a dû faire face dans les années 1990 et notamment le traumatisme lié à l'affaire de la vache folle, plusieurs organismes ont pris position contre la pratique des épandages de boues. Ainsi, certaines chartes ou cahiers des charges de production prévoient des mesures de restriction voire interdisent l'utilisation de boues résiduelles en agriculture. Les positions connues de l'époque, émises par les groupements de producteurs, sont reprises dans le tableau ci-après :

Tableau 10: Position des groupements de producteurs vis-à-vis de l'épandage de boues d'épuration

(Source : http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/42/08/46/PDF/these_SYLVIE_LUPTON.pdf)

Organisme	Production	Position pendant la promulgation de l'arrêté du 08/01/98	Conditions d'acceptation / Motif de refus	Position post-arrêté du 08/01/98
AGPB (Association Générale des Producteurs de Blé et autres céréales)	Céréales	Déconseille l'épandage de boues (1997)	- Incertitudes sur les effets sanitaires des boues - Responsabilité en cas de produits contaminés.	Pas de position connue
AGPM (Association de groupements de producteurs de maïs)	Maïs	Déconseille l'épandage de boues (1997)	Principe de précaution : refus des boues tant que leur innocuité ne peut pas être prouvée.	Pas de position connue
Alpina Savoie (anciennement Moulins de Savoie)	Blé dur	Interdiction d'épandage de boues sur les cultures dans les 2 dernières années précédant la signature du contrat.(1997)	Innocuité des produits épandus.	Pas de position connue
Carrefour	Filières engagement Qualité Carrefour	Refus d'épandage de boues (à partir de 1998)	- «épandage de boues de stations d'épuration interdit» - Traçabilité des produits et incertitudes sur les effets sanitaires des boues http://www.carrefour.com/sites/default/files/RAEXPERT2011LAST.pdf	Interdit
CGB (Confédération générale de la Betterave)	Betterave	Refus d'épandage de boues (1997)	- La réglementation est insuffisante pour garantir la sécurité des produits, - Crainte d'interdiction de cultiver face au renforcement des normes des IAA ⁶⁵	Pas de position connue
SNFS (Syndicat national des fabricants de sucre)	Sucres	Refus d'épandage de boues (1996)	-Concurrence à l'épandage des coproduits sucriers, manque de contrôle, incertitudes sur les répercussions sanitaires et environnementales des boues et problèmes de responsabilité en cas de contamination des cultures	Pas de position connue

⁶⁵ Industrie AgroAlimentaire

Actuellement, aucune information ne permet de remettre en cause ou de confirmer ces positions (à part pour les filières « Engagement Qualité » de Carrefour, pour lesquelles l'épandage de boues demeure interdit), mais le retour des agriculteurs-utilisateurs de sous-produits résiduaux urbains révèle qu'ils sont beaucoup moins soumis à pression ces dernières années qu'au début des années 2000. Cependant, malgré l'innocuité avérée des boues de Seine aval, la position de certains organismes n'est pas favorable à l'épandage.

De plus, depuis le milieu des années 2000 les positions d'industries agroalimentaires et d'enseignes de la grande distribution vis-à-vis de la valorisation agricole des boues urbaines évoluent. Les exemples de Bonduelle et de Banette peuvent être cités.

Tableau 11: Position de Banette et Bonduelle vis-à-vis de l'épandage de boues d'épuration

Organisme	Production	Position	Conditions d'acceptation
Banette	Farine	Tolérance sous réserves du respect de la réglementation (2011)	«Les boues des stations d'épuration ne doivent pas être épandues, sinon l'agriculteur doit exiger un certificat d'innocuité» http://www.pays-du-pithiverais.fr/fic_bdd/pdf_fr_fichier/13203141890_annexe_3.pdf
Bonduelle	Légumes	Tolérance sous réserves du respect de la réglementation (Charte 2015)	« S'engager à ne pas utiliser de boues non conformes » « Ne pas utiliser de boues de stations urbaines non traitées et non conformes aux normes » http://www.bonduelle.com/fileadmin/user_upload/ES_PACE_EXPERT/14-15/Charte_agronomique_Bonduelle_version_5.1.pdf

Cependant, d'autres industriels tels que McCain, Nestlé, Vico prévoient certaines clauses dans leurs contrats spécifiant l'interdiction d'utiliser des boues dans les 10 ans précédant l'implantation de la culture sous contrat. (www.jle.com/fr/revues/bio_rech/jpc/e-docs/00/00/EA/A6/).

Ces positions sont contradictoires puisque ces mêmes industriels produisent également des boues. La plupart (Nestlé, Bonduelle...) les valorisent en agriculture. Les positions enregistrées sont des positions de principe.

Nb : Le classement en déchet par la réglementation en 1997 et 1998 permet d'assurer une traçabilité optimale des boues depuis leur production jusqu'à leur valorisation.

Différentes positions plus mesurées ont été prises par rapport à l'épandage des boues d'épuration par des institutions ou fédérations nationales.

Tableau 12: Position des institutions et fédérations nationales vis-à-vis de l'épandage de boues d'épuration

Organisme	Position	Conditions d'acceptation / Motif de refus
ANIA (Association Nationale des Industries Alimentaires)	Favorable	« les épandages des boues sont encadrés par un arrêté dont il s'agit de veiller à la bonne application. Les recherches dans ce domaine se poursuivent notamment au travers du programme AGREDE (Agriculture et épandage des déchets urbains et agro-industriels) conduit par l'INRA, constituent en soi une mesure de précaution », (d'après Flash Ania-2000 n° 513) En 2007, l'ANIA réaffirme sa position : elle « est favorable à l'épandage sous réserve du respect de la réglementation qui en garantit l'innocuité ».
CSHPF (Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France)	Favorable	Les risques de pathogénicité sont extrêmement faibles du fait notamment de la limitation des voies de contamination. L'hygiénisation des boues par séchage et compostage limite fortement le nombre de micro-organismes pathogènes présents.
FNSEA (Fédération Nationale des Syndicats d'Exploitants Agricole) CNJA (Centre National des Jeunes Agriculteurs)	Contre puis Favorable	Boycott de l'épandage des boues en juin 1999 : position politique puis, acceptation avec la création du fonds de garantie (décret du 18 mai 2009) qui permet à l'agriculture d'utiliser les boues d'épuration sans être déconsidérée par les consommateurs

4.9.2 La réglementation européenne

4.9.2.1 La Directive européenne n°86-278

4.9.2.1.1 Les préconisations de la directive

La valorisation agricole des boues est encadrée par une réglementation européenne dans le cadre de la directive n°86-278 du 12/06/86 relative à la protection de l'environnement et notamment des sols. Cette directive est transcrite, dans le droit national par le décret du 08/12/1997 codifié dans le livre II du Code de l'Environnement : titre1-chapitre1-section2-sous-section2 et par son arrêté d'application du 08/01/1998.

Ces réglementations imposent notamment :

- 1) Le respect des principes d'intérêt agronomique et d'innocuité en fixant :
 - les éléments de caractérisation (paramètres agronomiques, Eléments-Traces Métalliques (ETM), Composés-Traces Organiques (CTO)),
 - les fréquences d'analyses de boues,
 - les seuils à respecter, sur les ETM et les CTO pour valoriser une boue de station d'épuration en agriculture.

La comparaison des éléments de caractérisation des boues, des éléments analysés et des valeurs limites des ETM entre l'arrêté du 8 janvier 1998 et la directive européenne du 12 juin 1986 montre que le texte français est plus strict que la directive européenne.

D'autre part, la réglementation nationale impose des prescriptions supplémentaires :

- des concentrations et des flux cumulés limites en CTO dans les boues,
- des valeurs limite en certains micro-organismes pour les boues dites « hygiénisées ».

L'arrêté du 8 janvier 1998 n'impose pas de critères rédhibitoires à l'épandage des boues urbaines en matière de micro-organismes pathogènes.

2) Un suivi et une auto-surveillance de manière à disposer d'un contrôle et d'une traçabilité de l'ensemble de la filière de valorisation :

Ce suivi se traduit notamment par l'élaboration de 3 documents qui ponctuent la campagne d'épandage. Leur nature et contenu sont présentés dans le tableau ci-après.

Tableau 13: Comparaison des documents réglementaires à remettre aux administrations compétentes
(Arrêté du 8 janvier 1998 / directive du 12 juin 1986)

	Documents de suivi remis aux administrations compétentes	
	Arrêté du 08/01/98	Directive du 12/06/86
Plan Prévisionnel d'Épandage (PPE)	<p>Article 3 :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Liste des parcelles et caractérisation des systèmes de culture, -Analyses de sols, -Caractérisation des boues, -Préconisation spécifiques d'utilisation des boues, -Modalité de surveillance. 	-
Registre d'épandage	<p>Article 17 :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Quantité de boues produites dans l'année, -Méthodes de traitement des boues, -Quantité épandue/unité culturale (références parcellaires, surfaces, dates d'épandage, cultures pratiquées), -Résultats d'analyses sur les sols et les boues (dates de prélèvement et de mesure, localisation). 	<p>Article 10</p> <ul style="list-style-type: none"> -Quantité de boues produites, -Quantité de boues livrées à l'agriculteur, -Caractérisation des boues, -Méthodes de traitement des boues, -Noms et adresses des destinataires des boues et lieux d'utilisation.
Bilan Agronomique (BA)	<p>Article 4 :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Bilan quantitatif et qualitatif des boues épandues, -Exploitation du registre d'épandage (éléments fertilisants apportés par les boues, analyses de sol...), -Bilans de fumure et conseils de fertilisation complémentaires, -Remise à jour éventuelle des données de l'étude initiale. 	-

4.9.2.1.2 Les révisions en cours de la réglementation

1) La Directive Européenne

Une révision de la directive européenne de 1986 a été entreprise en 1999. La dernière version ou "draft" concernant ces révisions date d'avril 2003. Depuis, différents scénarii d'évolution des règles au niveau communautaire ont été proposés. En mai 2009, la commission a proposé un document dans lequel l'objectif était de rassembler et de réglementer dans un même texte, la gestion des boues et la gestion des bio-déchets, les règles différant selon la qualité et l'origine des matières.

Trois modifications majeures de la directive européenne actuelle sont proposées :

- l'ajout de normes pour les HAP,
- la baisse des limites de flux pour le plomb et le mercure,
- la diminution des concentrations en plomb et en zinc dans les boues

Tableau 14: Comparaison des valeurs limites en éléments-traces métalliques dans les boues et dans les sols (Document du 21/09/10 / Arrêté du 8 janvier 1998 / Directive du 12 juin 1986)

	Seuils pour les éléments-traces métalliques dans les boues (mg/kg de MS)		
	Document du 21/09/10 proposé par la commission	Arrêté du 08/01/98	Directive du 12/06/86
Cd	10	10	20 à 40
Cr	1000	1000	Non fixé
Cu	1000	1000	1000 à 1750
Hg	10	10	16 à 25
Ni	300	200	300 à 400
Pb	500	800	750 à 1200
Zn	2500	3000	2500 à 4000

	Flux maximum cumulé, apporté par les boues en 10 ans (g/ha/an)		
	Document du 21/09/10 proposé par la commission	Arrêté du 08/01/98	Directive du 12/06/86
Cd	15	15	15
Cr	3000	1500	Non fixé
Cu	3000	1500	12 000
Hg	10	15	100
Ni	750	300	3000
Pb	1000	1500	15 000
Zn	7500	4500	30 000

Le document du 21/09/10, de la commission européenne, propose d'abaisser les valeurs limites initiales des ETM mentionnées dans la directive du 1986. Ces nouvelles valeurs limites sont très proches, voire identiques, à celles définies dans l'arrêté du 08/01/1998.

A l'heure actuelle, la révision de la directive n'est pas jugée prioritaire par la commission européenne, qui estime que les lois transcrites dans les différents pays de l'UE⁶⁶ permettent d'assurer une maîtrise des risques satisfaisante.

⁶⁶ Union Européenne

2) L'arrêté du 08/01/1998

Le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie travaille également depuis 2013 à un projet d'actualisation de l'arrêté du 08 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles.

La révision de l'arrêté est actuellement en cours de consultation et les points suivants sont envisagés :

- actualisation des références réglementaires suite à la codification du décret du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage de boues issues du traitement des eaux usées dans le code d'environnement;
- consolidation des dispositions liées au stockage suite à la modification de l'intitulé de la rubrique 2.1.3.0 de la nomenclature des installations, ouvrages, travaux et activités (IOTA) soumis à autorisation ou à déclaration en application des articles L. 214-1 et suivants du code de l'environnement.);
- intégration de nouvelles prescriptions dans le cas de mélange de boues provenant d'installations de traitement des eaux usées distinctes ;
- reprise de certaines dispositions figurant dans l'arrêté du 21 juillet 2015 ;
- actualisation des références pour les méthodes de préparation et d'analyses dans les sols et dans les boues.

4.10 Thème 10 : L'aptitude de certains sols

Les éléments ci-après permettent de compléter le dossier de demande d'autorisation afin de répondre à certaines observations formulées au cours de l'enquête.

Les observations reprises dans le thème 10 : "L'aptitude de certaines sols" par la commission d'enquête évoquent différents sujets comme :

- Parcelles situées à proximité d'habitations, zones recevant du public, zones boisées, cours d'eau
- Parcelles situées à proximité de captage, marnières, aqueduc, plan d'eau, AAC, périmètre de protection de captage...
- Constitution du périmètre d'épandage, choix des communes
- Accumulation des micropolluants
- Présence de substances émergentes dans les boues

4.10.1 La constitution du périmètre d'épandage

Les agriculteurs sont très demandeurs de produits organiques car ceux-ci présentent un réel intérêt, tant pour la fertilisation des cultures, que pour l'entretien de la structure et de la vie du sol.

Les boues de l'usine d'épuration Seine aval sont déjà aujourd'hui valorisées en Eure-et-Loir. La filière est encadrée par l'arrêté d'autorisation du 11 juin 2004 modifié le 14 janvier 2014 et du 28 mai 2010.

La demande d'autorisation concerne 75 communes pour une superficie de 6 694,02 ha total dont 6 439,17 ha épandables. Il s'agit d'un renouvellement des autorisations et d'un ajout de surface de 760,52 ha total dont 753,34 ha épandables. Les surfaces ajoutées se situent uniquement sur des communes déjà autorisées par les arrêtés actuellement en vigueur.

Il n'y a pas eu de démarchage d'agriculteur pour constituer la mise à jour du périmètre d'épandage. En effet, les surfaces supplémentaires ont été intégrées par l'ajout de parcelles au périmètre d'épandage d'agriculteurs déjà autorisés et par un phénomène de bouche à oreille avec des agriculteurs nouveaux qui ont contacté le prestataire du SIAAP pour intégrer le plan d'épandage. Il s'agit d'une démarche volontaire de la part des agriculteurs.

Les communes concernées par le projet sont celles sur lesquelles se trouvent les parcelles. Ces communes sont toutes déjà autorisées par les arrêtés d'autorisation qui encadrent actuellement la filière (communes soumises à enquête publiques en 2003 et/ou en 2009).

L'aptitude à l'épandage des parcelles est ensuite vérifiée lors de la réalisation du dossier d'autorisation.

4.10.2 L'aptitude des sols à l'épandage

4.10.2.1 Les règles d'épandage et d'entreposage

4.10.2.1.1 Les règles d'épandage

La réglementation en vigueur à savoir, les articles R.211-25 à R211-47 du livre II du code de l'Environnement, l'arrêté du 08/01/1998, le PAN, le PAR Centre Val-de-Loire, les arrêtés d'autorisation du 11 juin 2004 modifié le 14 janvier 2014 et du 28 mai 2010 mentionne les règles d'interdiction d'épandage :

- sur des sols dont les teneurs en ETM dépassent les valeurs limites fixées par l'arrêté du 8 janvier 1998,
- sur les sols dont le pH est inférieur à 6,

- tant que l'une des teneurs en éléments ou composé-traces dans les boues n'excède les valeurs limites figurant dans l'arrêté du 8 janvier 1998,
- dès lors que le flux, cumulé sur une durée de dix ans, apporté par les boues sur l'un de ces éléments ou composés excède les valeurs limites figurants dans l'arrêté du 8 janvier 1998,
- sur les terrains destinés ou affectés aux cultures maraîchères, 10 mois ou moins avant la récolte,
- sur des herbages ou des cultures fourragères, 3 semaines ou moins suivant la récolte des cultures fourragères ou la mise à l'herbe des animaux,
- en période de forte pluie et sur des sols détremés ou inondés,
- sur des sols enneigés ou pris en masse par le gel,
- sur des sols non cultivés,
- à certaines périodes selon le type de culture suivant l'épandage
- à moins de 35 m des cours d'eau (10 m si bande enherbée de 10 m, 100 m si pente > 7 %),
- à moins de 35 m des plans d'eau (100 m si pente > 7 %),
- à moins de 35 m (100 m si pente > 7 %) des puits, forages, sources, aqueducs transitant des eaux destinées à la consommation humaine en écoulement libre, installations souterraines ou semi-enterrées utilisées pour le stockage des eaux, que ces dernières soient utilisées pour l'alimentation en eau potable ou pour l'arrosage des cultures maraîchères,
- sur les parcelles situées en périmètre de protection immédiat et rapproché de captage.
- A moins de 300m des ouvrages publics de production d'eau destinés à la consommation humaine n'ayant pas fait l'objet de la procédure d'instauration des périmètres de protection,
- A moins de 40m des aqueducs transitant des eaux destinées à la consommation humaine.

Le SIAAP va au-delà des prescriptions réglementaires en s'imposant :

- de ne pas épandre sur les sols destinés ou affectés aux cultures maraichères,
- de ne pas épandre sur prairie, ni sur pâture.

4.10.2.1.2 Les règles de l'entreposage

Les boues peuvent être stockées uniquement sur des zones aptes à l'épandage en respectant une distance d'isolement de 3m par rapport aux routes et fossés.

De part leur caractère solides, stables et hygiénisées et d'après l'article 5 de l'arrêté du 8 janvier 1998, les entreposages de boues peuvent être stockés toute l'année en tête de parcelle sans distance d'isolement par rapport aux habitations.

Toutefois le SIAAP va au delà de la règlement en :

- s'imposant une distance minimum de 100m par rapport aux habitations,
- ne réalisant pas de stockage à proximité des monuments historiques,
- ne stockant les boues qu'à partir du 1er avril pour les parcelles situées dans les Aires d'Alimentation de Captage prioritaire Grenelle et de Conférences environnementales.

4.10.2.1.3 Épandage à proximité des habitations

Dans le cas de boues hygiénisées, la réglementation ne prévoit pas de distance d'isolement par rapport aux habitations, aux zones de loisirs ou aux établissements recevant du public pour la réalisation des stockages et des épandages.

L'agriculteur s'engage, par l'intermédiaire de la convention bilatérale, à enfouir les boues dans les 48h à moins de 100 m des habitations et le plus rapidement possible en dehors.

4.10.2.1.4 Épandage à proximité de l'aqueduc de l'Avre

Une distance d'isolement de 40m a été prise par rapport à l'aqueduc de l'Avre sur les 4 parcelles situées à proximité.

Aucun épandage n'aura donc lieu dans les zones de protection immédiates, rapprochées et éloignées de l'aqueduc de l'Avre.

4.10.2.1.5 Épandage à proximité des cours d'eau et risque de ruissellement

Le risque lié à l'épandage des boues sur des sols en pente est l'entraînement par ruissellement des particules de boues vers les cours d'eau. Il peut exister un risque lié au ruissellement des particules de boues notamment sur des parcelles en forte pente.

Toutefois, le respect des différentes réglementations en vigueur permet de réduire considérablement ce risque. L'épandage des boues de Seine aval respecte les distances réglementaires imposées par l'arrêté du 8 janvier 1998, par le Programme d'Actions Régional (PAR) de la région Centre-Val de Loire du 28 mai 2014 et par le Programme d'Actions National (PAN) du 19 décembre 2011 complété par l'arrêté modificatif du 23 octobre 2013 et du 11 octobre 2016, à mettre en œuvre en vue de la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole.

L'épandage des boues de Seine aval n'est pas pratiqué sur des terrains dont la pente est supérieure à 7% et à moins de 100 m des cours d'eau. De plus les boues sont enfouies dans les premiers centimètres du sol dans les 48h après l'épandage à 100m des habitations et sinon dans les plus brefs délais.

La parcelle apte à l'épandage la plus proche du cours d'eau *La Voise* (OBS R.inf 13) est relativement plane avec une pente moyenne de 2% (source : www.geoportail.gouv.fr - profil altimétrique) et elle est située à plus de 600m de *La Voise*. Le risque d'entraînement de particule de boue vers le cours d'eau est donc nul.

4.10.2.2 La directive nitrates

Le calendrier d'épandage à respecter pour l'épandage des boues est défini par le PAN et le PAR de la région Centre Val-de-Loire issus de la directive nitrate.

La directive "nitrates" (91/676/CEE) du 12 décembre 1991 concerne la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole. Elle a pour objet la limitation des émissions d'azote par l'agriculture, et plus particulièrement par les effluents des élevages intensifs. L'objectif est d'assurer un meilleur respect des normes relatives à la teneur en nitrate des eaux brutes superficielles et souterraines destinées à la consommation humaine, et de réduire le développement de zones soumises à l'eutrophisation.

Elle prévoit :

- la désignation de « zones vulnérables », parties de territoires alimentant des masses d'eau dépassant ou risquant de dépasser le seuil de 50 mg/L en nitrate, ainsi que celles présentant des tendances à l'eutrophisation,
- la rédaction d'un code de bonnes pratiques agricoles,
- la mise en place d'une réglementation à appliquer en zone vulnérable,
- la réalisation d'un programme de surveillance.

Cette directive a été traduite en droit français par le décret n° 93-1038 du 27 août 1993.

Les zones vulnérables et les programmes d'action font régulièrement l'objet d'actualisations. Ces zones ont été révisées en 2015 sur la base des résultats de concentrations des eaux souterraines et superficielles mesurés en 2013 (arrêté n°2015046-0001 du 13 mars 2015 portant sur la délimitation des zones vulnérables aux pollutions par les nitrates d'origine agricole sur le bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands et l'arrêté préfectoral n°17-014 du 2 février 2017 portant désignation des zones vulnérables à la pollution des nitrates d'origine agricole dans le bassin Loire-Bretagne).

L'ensemble des communes concernées par le périmètre d'épandage des boues de Seine aval dans le département de l'Eure-et-Loir est classé en « zone vulnérable » à la pollution par les nitrates d'origine agricole.

Un Programme d'Actions National (PAN du 19 décembre 2011), entré en application le 1er septembre 2012 et modifié par l'arrêté du 23 octobre 2013 et du 11 octobre 2016 précise les conditions d'épandage et de stockage des effluents azotés en zone vulnérable. Il est composé de mesures relatives :

- aux capacités de stockage des effluents d'élevage,
- au stockage de certains effluents aux champs,
- aux périodes d'interdiction d'épandage des fertilisants azotés,
- à la limitation de l'épandage des fertilisants, afin de garantir l'équilibre de la fertilisation azotée,
- aux modalités d'établissement du plan de fumure et du cahier d'enregistrement des pratiques,
- aux modalités de calcul de la quantité maximale d'azote contenu dans les effluents d'élevage pouvant être épandue annuellement par chaque exploitation,
- aux conditions d'épandage par rapport aux cours d'eau.

En Eure-et-Loir, le PAN est complété depuis le 28 mai 2014 par le Programme d'Actions Régional (PAR) de la région Centre-Val-de-Loire, qui précise et renforce certaines des mesures du PAN et qui comprend des actions complémentaires sur des secteurs géographiques particuliers.

Les règles sont établies par un groupe régional d'expertise « nitrates » (GREN) sous la présidence du préfet de région et qui a défini, après concertation, les bonnes pratiques à mettre en œuvre dans l'arrêté du 29/04/2015 modifié par l'arrêté du 24/01/2017 établissant le référentiel régional de la mise en œuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée pour la région Centre-Val-de-Loir.

L'ensemble des règles du PAN et du PAR est pris en compte dans la définition des aptitudes à l'épandage du parcellaire et dans l'organisation et la mise en œuvre des épandages.

Le PAN et le PAR définissent entre autres les périodes autorisées pour les épandages, en fonction du type d'effluents. Pour les boues de Seine aval, le calendrier d'épandage est résumé dans le tableau suivant.

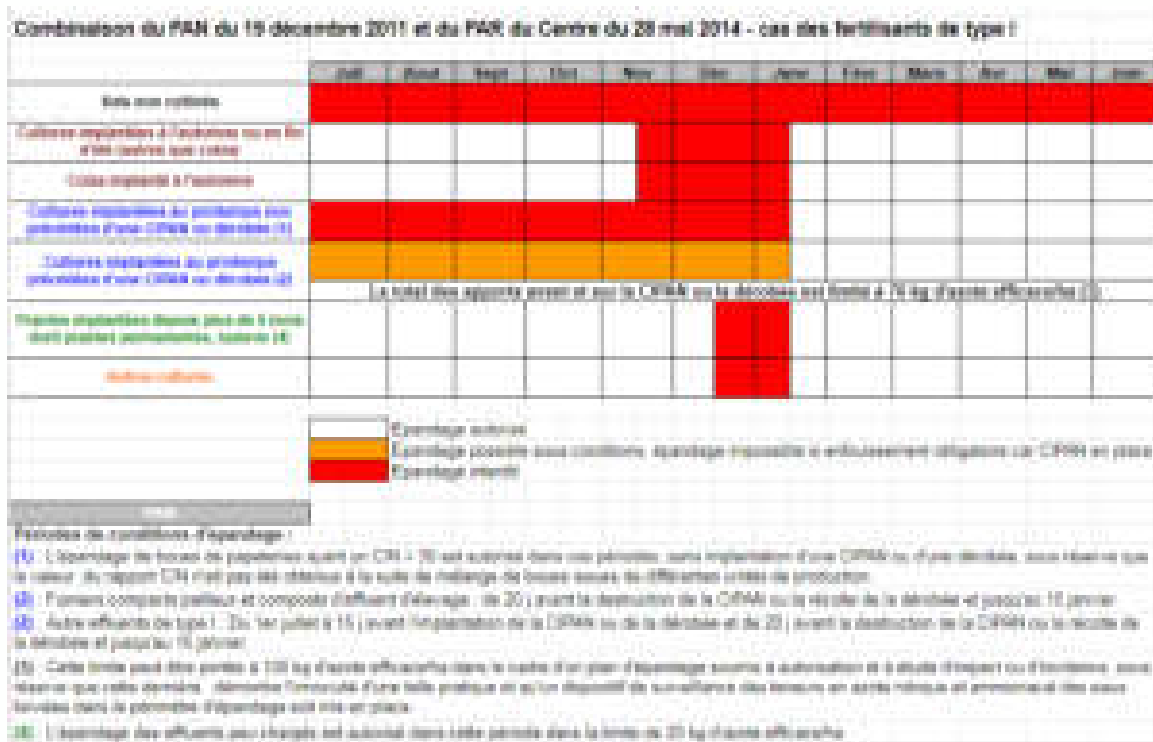


Figure 16: Calendrier d'épandage

4.10.3 La prise en compte des marnières et bétoires

Ces particularités géologiques (ou géographiques) sont à prendre en compte, puisque très exposées aux risques de pollution des eaux souterraines.

La base de données « BDCavité » est gérée et développée par le BRGM⁶⁷. Elle recense les cavités souterraines (y compris les cavités abandonnées) et les effondrements associés répertoriés en France métropolitaine.

Les cavités souterraines sont classées par type :

- Naturelle (karst, gouffres, grottes, cavité de suffosion),
- Anthropique (carrières, marnières, caves, etc.).

Les mouvements de terrain connus (tassements, affaissements, fontis, effondrements généralisés) liés à l'effondrement de cavités souterraines sont également recensés.

Les données contenues dans BDCavités sont issues :

- d'archives et d'inventaires partiels détenus par les organismes contributeurs à l'alimentation de la base ;
- d'inventaires départementaux spécifiques réalisés depuis 2001 ;
- d'informations ponctuelles d'origine variée (média, études, particuliers, collectivités, associations,...).

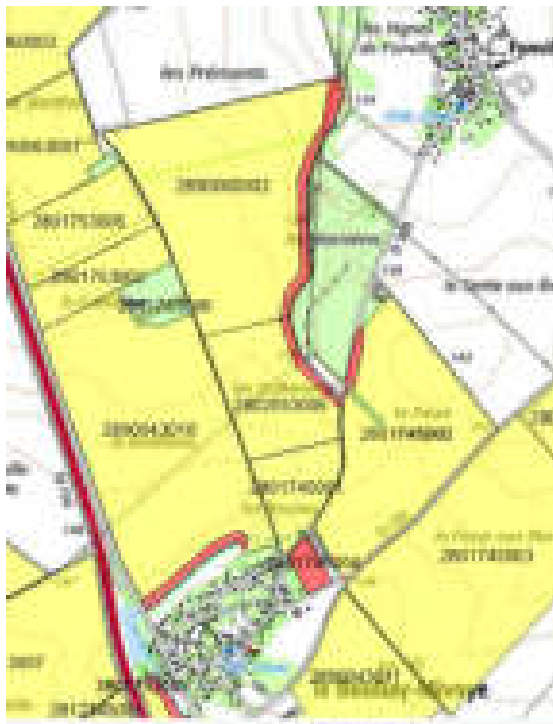
⁶⁷ Bureau de Recherches Géologiques et Minières

Afin de prendre en compte la sensibilité du secteur due à la présence de cavités souterraines difficilement visibles sur le terrain pour certaines, nous proposons d'appliquer une distance d'isolement de 35m par rapport à la bordure du bois "Les Marnières".

Les nouvelles aptitudes des 3 parcelles longeant le bois sont les suivantes :

Tableau 15: nouvelles aptitudes des parcelles
(2890060002, 2802053005, 2801745002)

Code Suivra	Aptitude 0 (ha)	aptitude 1 (ha)	surface totale (ha)
2890060002	3,02	41,71	44,73
2802053005	1,02	14,05	15,07
2801745002	0,68	31,46	32,14



Les bétouilles citées dans le courrier de Eau de Paris en date du 24/10/2019 sont effectivement situées dans le lit du ruisseau *Roule Crotte* sur la commune de Boissy-lès-Perche soit à 150m de la parcelle OH124. Les distances d'isolement par rapport au ruisseau et aux bétouilles sont donc bien respectées.

4.10.4 Épandage en AAC

Le chapitre 4.3.9.3 *Les Aires d'Alimentation de Captage prioritaire (AAC)* du thème 3 : La composition des boues et leur toxicité présente les AAC.

Comme présenté dans le chapitre 4 de l'Étude préalable, 13 AAC sont concernées par le périmètre d'épandage des boues de Seine aval.

La protection de ces aires d'alimentation de captages passe par la définition d'une Zone de Protection de l'Aire d'Alimentation de Captage (ZPAAC) et par l'élaboration d'un programme d'actions visant, en particulier, à des évolutions de pratiques agricoles au sein de cette zone. Afin de mettre en place ce programme, des études, portant sur des diagnostics effectués chez des agriculteurs volontaires, doivent être menées sur chacune des aires d'alimentation de captage prioritaire.

Les évolutions de pratiques agricoles sont d'abord testées volontairement par les agriculteurs (économies d'engrais et de pesticides, remise en herbe de certaines parcelles, etc.), puis rendues obligatoires, si opportunes, après constat d'efficacité.

Les caractéristiques des boues de Seine aval (stabilisées, déshydratées, rapport C/N supérieur à 8, et contenant une faible part d'azote minéral), et les dispositions prises par le SIAAP pour le stockage et l'épandage de ces matières organiques (raisonnement de la fertilisation, distances d'isolement...) permettent de respecter les prescriptions applicables en ZPAAC des captages prioritaires d'Eure-et-Loir.

Le SIAAP s'engage à respecter les prescriptions des plans d'actions des 13 AAC de captages prioritaires concernées par son périmètre d'épandage.

Le SIAAP mènera une veille réglementaire sur l'avancée des démarches liées aux autres captages prioritaires, et prendra en compte les aires et plans d'actions qui seront établis.

Les mesures liées à la DUP de l'Aire d'alimentation des captages de la Vigne seront prises en compte dès leurs parution.

4.10.5 Épandage en PPC

Comme présenté dans le chapitre 4.3.9.2 *Les captages d'Alimentation en Eau Potable (AEP)* du thème 3 : "La composition des boues et leur toxicité", toutes les parcelles présentes dans les périmètres de protection de captage ont fait l'objet d'une attention particulière. En effet, toutes les parcelles situées en périmètre de protection immédiate et rapprochée de captage d'eau potable ont été classées inaptées à l'épandage.

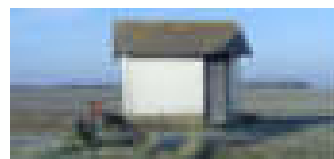
De plus, le dossier de demande d'autorisation a été instruit par l'ARS qui n'a émis aucune remarque particulière.

Les périmètres de protection des deux captages situés sur les commune de Béville le Comte et Saint Léger des Aubées ont bien été pris en compte. La parcelle 2800012 située en périmètre rapprochée a été classée en inapte à l'épandage.

Une observation relève l'oubli de la prise en compte d'un captage visible sur le fond IGN⁶⁸ et nommée "source captive" en bordure de la parcelle 2801745001.

Les données de l'ARS Centre-Val-de-Loire sur les périmètres de protection de captages (site à accès privé consulté à nouveau le 12/11/2019) ne mentionne aucun captage à cet endroit.

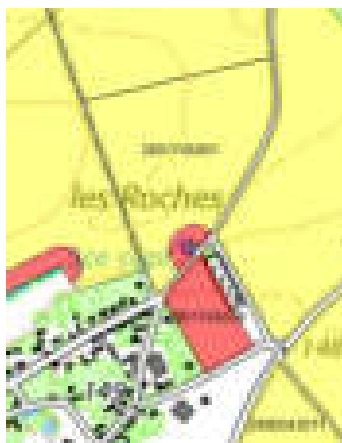
Des informations concernant cette observation ont été récoltées auprès de l'agriculteur : il s'agit d'un point de prélèvement pour l'irrigation nommé *CUMA du Boullay-Mivoye* utilisé par 4 exploitants agricoles.



Une distance d'isolement de 35m va être ajoutée par rapport à ce point.

Tableau 16: Aptitude actualisée (2801745001)

Code Suivra	Aptitude 0 (ha)	Aptitude 1 (ha)	surface totale (ha)
2801745001	0,33	7,29	7,62



⁶⁸ Institut National de l'Information Géographique et forestière

Une veille réglementaire est réalisée annuellement par le SIAAP afin d'actualiser et de prendre en compte toutes les modifications liées aux captages d'eau potables et aux mesures de protection. Ces évolutions sont prises en compte pour l'actualisation de l'aptitude des parcelles à l'épandage.

4.10.6 Risques liés à l'accumulation des éléments-traces

4.10.6.1 Accumulations dues aux épandages

Comme présenté dans le chapitre 4.3.10 *Suivi des sols* du thème 3 : "La composition des boues et leur toxicité", l'aptitude des sol à l'épandage est confirmée par des analyses de sol (pH et ETM) réalisées sur des points de référence (1 analyse pour 20 ha de zone homogène et par exploitation agricole) qui servent de témoins et qui sont analysés tous les 10 ans. L'arrêté du 08/01/1998 fixe les valeurs seuils en ETM à ne pas dépasser. De plus, des flux limites en ETM et CTO apportés par les boues sur 10 ans sont imposés par ce même arrêté.

Le SIAAP par l'intermédiaire de son prestataire a développé des outils permettant de contrôler les flux cumulés, de prévenir l'atteinte des valeurs limites pour chaque parcelle, et par conséquent, de fiabiliser le respect de la réglementation.

4.10.6.2 Accumulations dues au stockage

Les lieux de livraison sont retenus pour leur aptitude au stockage et sont définis, au moment des commandes. Les stockages sont réalisés sur des parcelles du périmètre aptes à l'épandage, ou des plateformes, et en dehors des périmètres de captage immédiats, rapprochés ou éloignés.

Le SIAAP s'est interrogé sur le comportement des tas de boues de Seine aval en tête de parcelle. Il a réalisé une étude en 1999, afin de mesurer l'éventuel impact de ces entreposages, et de définir, en fonction des résultats obtenus des recommandations à suivre.

Les résultats sur les boues montrent que :

- il n'y a pas de variation des teneurs des paramètres agronomiques (rapportée sur la matière sèche),
- il n'y a pas de variation des teneurs en ETM dans les boues,
- la couche superficielle du tas de boues de Seine aval absorbe les 1^{ères} pluies, sans liquéfier la boue. En séchant une croûte se forme, et les eaux pluviales supplémentaires ruissellent sur cette croûte, n'entraînant pas ou peu d'éléments.

Sur les jus de ruissellement et le sol, les conclusions sont les suivantes :

- l'impact des jus d'écoulement est faible,
- l'entreposage à même le sol n'a pas modifié la nature des sols récepteurs de manière sensible.

Ainsi, l'étude montre que le stockage temporaire des boues de Seine aval n'a pas d'impact environnemental significatif.

Dans le respect des conditions et des distances d'isolement, imposées par la réglementation, les risques de pollution des eaux et des sols lors du stockage des boues de Seine aval ne sont pas significatifs.

Afin d'actualiser les données recueillies au cours de la première étude de 1999, et de disposer d'éléments factuels démontrant l'impact d'un entreposage de boues thermiques de Seine aval en tête de parcelle, le SIAAP a mis en place un nouvel essai en 2014 sur le site de Seine aval, visant à apporter des éléments de réponses supplémentaires aux interrogations suivantes :

- Les boues de Seine aval génèrent-elles un lessivage d'éléments fertilisants ou d'éléments-traces (ETM, CTO) sur la surface couverte par le dépôt ? Ce lessivage peut résulter d'un éventuel lessivage du tas par la pluviométrie absorbée, ou par l'éventuel ressuyage des boues. On s'intéresse ici aux jus éventuellement relargués par l'intérieur du tas (jus d'infiltration).
- Le ruissellement de la pluie sur le tas de boues entraîne-t-il un départ d'éléments fertilisants ou d'éléments-traces susceptibles de s'accumuler à proximité du tas et de générer un impact environnemental ? On s'intéresse ici aux jus coulant en surface du tas, et non absorbés (jus de ruissellement).
- Quelle est l'évolution de la composition des boues après plusieurs mois d'entreposage ? Est-elle de nature à modifier les paramètres agronomiques et environnementaux ?

L'essai s'est déroulé sur une période d'un an :

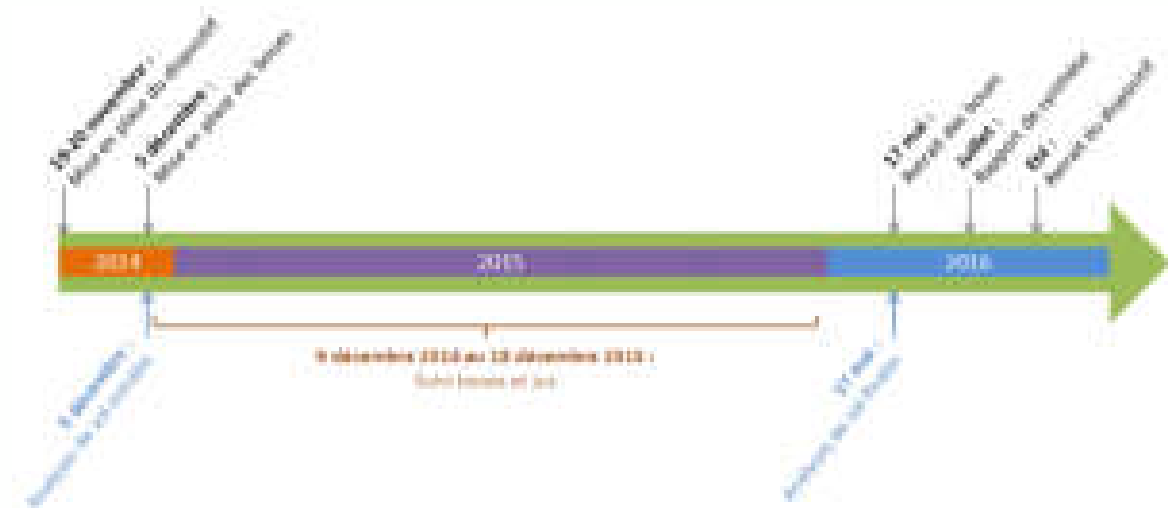
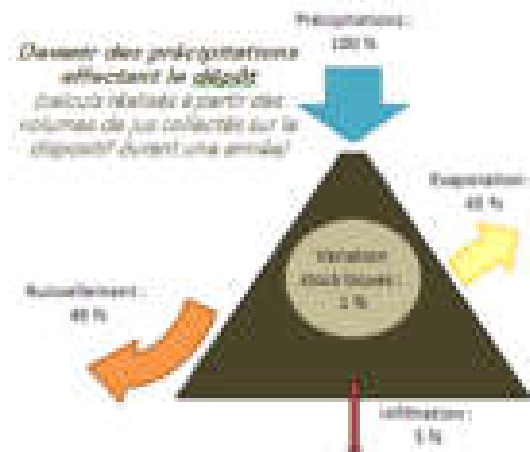


Figure 18: Planning du suivi



Sur la durée de l'essai (1 an), 54 % du volume de précipitations affectant le dépôt de boues ont été collectés sous forme de jus. Parmi ces jus, 90 % sont des jus de ruissellement. En conséquence, les boues de Seine aval sont peu perméables aux précipitations, du fait de leur nature hydrophobe et de leur compaction. Cela confirme les résultats concernant l'évolution du taux de matière sèche des boues. En séchant, une croûte se forme à la surface des boues et les précipitations ruissellent majoritairement sur cette croûte, laissant peu de place à l'infiltration.

Le bilan hydrique a montré que les deux principales voies de pertes d'eau d'un dépôt de boues de Seine aval sont l'écoulement superficiel par ruissellement et l'évaporation.



Ce suivi a permis de montrer les éléments suivants :

- le maintien des caractères solide, stabilisé et hygiénisé des boues,
- l'entreposage ne modifie ni le potentiel agronomique, ni la conformité des boues à la valorisation agricole,
- l'impact de l'entreposage des boues de Seine aval sur les sols est nul à faible.

Ce suivi permet de démontrer que l'entreposage des boues de Seine aval en tête de parcelles n'a pas d'impact. Cette étude est actuellement en train d'être complétée par un nouveau suivi sur l'impact de l'entreposage de boues de Seine aval sur les sols de parcelles du périmètre d'épandage.

En conclusion, le tonnage de boues déposé en tête de parcelle varie essentiellement en fonction de la siccité des boues, les principales pertes d'eau étant constituées par l'écoulement des jus de ruissellement et par l'évaporation.

Les quantités d'éléments fertilisants, d'ETM et de CTO exportés par les jus au cours du stockage sont minimales :

- par rapport aux stocks initialement présents dans les boues,
- par rapport aux stocks initialement présents dans les sols, et par rapport aux flux limites définis par l'arrêté du 8 janvier 1998 pour les ETM et les CTO.

L'exportation d'éléments par les jus, s'écoulant principalement à la surface du dépôt, n'est donc pas de nature à faire varier les teneurs des éléments présents dans les boues.

Aussi, l'impact attendu de l'écoulement de ces jus sur les sols est nul à faible.

4.10.7 Les substances émergentes

Les éléments de réponses sont présentées dans le chapitre 4.3.1.2.3 *Substances émergentes* du thème 3 : La composition des boues et leur toxicité.

4.11 Thème 11 : L'exécution de la filière d'épandage

Les éléments ci-après permettent de compléter le dossier de demande d'autorisation afin de répondre à certaines observations formulées au cours de l'enquête.

L'observation reprise dans le thème 11 : "L'exécution de la filière d'épandage" par la commission d'enquête évoquent différents sujets comme :

- Les nuisances lors des épandages
- Les consignes d'épandage

4.11.1 Les mesures pour limiter les nuisances

Les nuisances liées aux épandages des boues de Seine aval en Eure-et-Loir est plus largement développé dans le chapitre 4.6 *Thème 6 : Les principales nuisances constatées*, ainsi qu'au chapitre 4.4.3.5 *Les épandages*.

4.11.2 La mise en oeuvre de la filière

La mise en oeuvre de la filière est développée au chapitre 4.4.3 *La traçabilité des boues de Seine aval et l'exécution de la filière* dans le chapitre 9 de l'Étude préalable.

4.11.3 Epandage autour du hameau de Séreville

Les épandages de boues de Seine aval sont réalisés hors période de grand vent avec du matériel adapté utilisé classiquement pour ce type de fertilisant. Les risques de projection de boue sur les parcelles agricoles situées à proximité est très faible. De plus, les boues de Seine aval ne sont pas pulvérulente, elles sont constituées d'environ 50% d'eau, elles ne se volatilisent pas sur de longue distance.

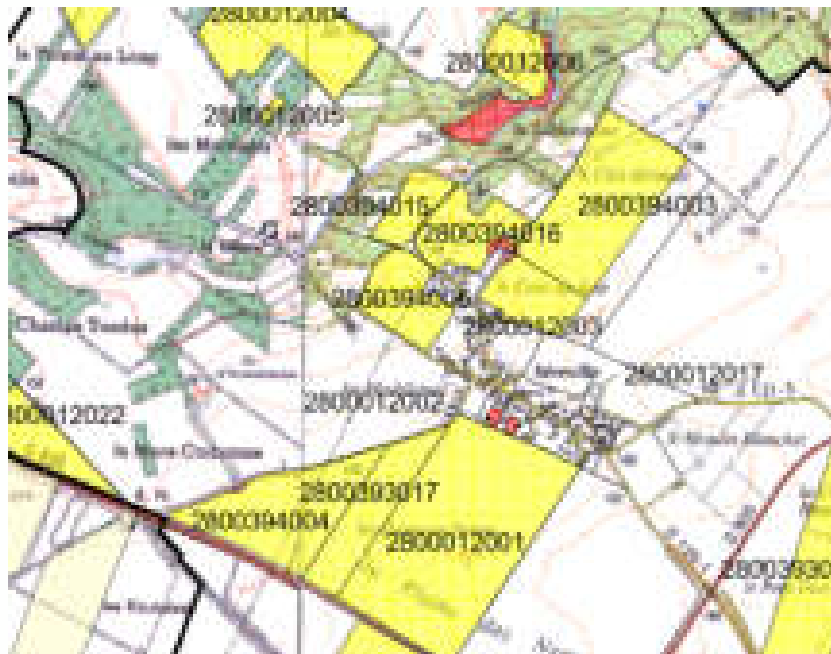
L'"OBS Ma L11" évoque une problématique d'épandage en 2014 lors de conditions climatiques défavorables entre autre le vent. Les épandages des boues de Seine aval n'ont pas lieu en période de fort vent. De plus aucun épandage n'a eu lieu en 2014 sur la commune de Mainvilliers.

Les 14 épandages ont eu lieu sur le secteur du hameau de Séreville au cours des dix dernières années.

Tableau 17: Epandage autour du hameau de Séreville (commune de Mainvilliers)

Année d'épandage	Parcelle concernée
2010	<ul style="list-style-type: none"> • 2800394006 Les Champs Fleuris d'EARL⁶⁹ PICHON (6,75ha épandus) • 28003940015 La Rue Bernier d'EARL PICHON (2,98ha épandus) • 2800394016 La Rue Bernier 2 d'EARL PICHON (6,91ha épandus) • 2800012001 Les Neaux d'EARL MALEPART (35,20ha épandus)
2011	<ul style="list-style-type: none"> • 2800394003 Les Laders d'EARL PICHON (17,52ha épandus) • 2800012003 Les Laders d'EARL MALEPART (5,55ha épandus)
2012	<ul style="list-style-type: none"> • 2800394004 Le Bout des Neaux d'EARL PICHON (14,17ha épandus)
2013	-
2014	-
2015	<ul style="list-style-type: none"> • 2800012001 Les Neaux d'EARL MALEPART (35,15ha épandus)
2016	<ul style="list-style-type: none"> • 2800394003 Les Laders d'EARL PICHON (17,49ha épandus) • 2800394006 Les Champs Fleuris d'EARL PICHON (6,71ha épandus) • 28003940015 La Rue Bernier d'EARL PICHON (3,06ha épandus) • 2800394016 La Rue Bernier 2 d'EARL PICHON (6,50ha épandus)
2017	<ul style="list-style-type: none"> • 2800394004 Le Bout des Neaux d'EARL PICHON (14,15ha épandus)
2018	-
2019	<ul style="list-style-type: none"> • 2800012003 Les Laders d'EARL MALEPART (5,30ha épandus)

La carte suivante permet de situer les parcelles autour du hameau de Séreville sur la commune de Mainvilliers :



⁶⁹ Exploitation Agricole à Responsabilité Limitée

4.12 Thème 12 et 13 : l'information du public et des élus et questions diverses

Les éléments ci-après permettent de compléter le dossier de demande d'autorisation afin de répondre à certaines observations formulées au cours de l'enquête.

Les thèmes 12 et 13 ont été regroupés dans un seul chapitre car ils se rapprochent de part la nature des observations liées à la communication autour de l'enquête publique.

Les observations reprises dans le thème 12 : "L'information du public et des élus" et dans le thème 13 "Questions diverses" par la commission d'enquête évoquent différents sujets comme :

- l'affichage relatif à l'enquête publique,
- la répartition des communes soumises à enquête publique,
- l'engagement et les intérêts des agriculteurs,
- la prise en compte des contraintes environnementales.

4.12.1 Engagements et intérêts des agriculteurs

4.12.1.1 Les engagements

Dès l'obtention de l'arrêté d'autorisation, une convention tripartite, entre le SIAAP, son prestataire pour la gestion des épandages et l'agriculteur est signée au titre de l'écoconditionnalité PAC. Elle définit les droits et engagements de chacune des parties signataires dans l'opération d'épandage des boues de Seine aval.

L'exploitant agricole s'engage par l'intermédiaire de cette convention :

- à intégrer aux prévisions d'épandage uniquement les parcelles qu'il exploite et qui sont autorisées par l'arrêté préfectoral (point contrôlé au moment de la prise de commande par le technicien en charge du suivi des épandages),
- à informer à la prise de commande, toute modification de parcellaire mis à disposition pour l'épandage,
- à ne pas utiliser d'autres produits soumis à plan d'épandage sur le même parcellaire,
- à enfouir les boues dans les 48h à moins de 100m des habitations, et dans les meilleurs délais en dehors de ces zones, en général 48h suivant l'épandage,
- dans le cas où le parcellaire est situé en zone vulnérable, à respecter les prescriptions définies par la réglementation relative à la lutte contre la pollution des nitrates d'origine agricoles (PAN et PAR),
- à informer le SIAAP de tout incident qu'il pourrait constater sur le bon déroulement de l'épandage et de son impact sur l'environnement,
- enfin, le SIAAP peut demander à l'agriculteur de désister des parcelles au profit du plan d'épandage de la collectivité locale concernée.

La convention entre en vigueur à la date de sa signature et demeure valable pour la durée de validité des arrêtés préfectoraux. Elle peut être résiliée par le SIAAP ou l'agriculteur avant son terme, sur simple courrier exposant les raisons.

4.12.1.2 les intérêts

Les agriculteurs sont très demandeurs de produits organiques car ceux-ci présentent un réel intérêt, tant pour la fertilisation des cultures, que pour l'entretien de la structure et de la vie du sol.

Le SIAAP a fait le choix d'appliquer le principe du rendu-racine gratuit pour la filière d'épandage des boues de Seine aval : l'exploitant agricole ne paie ni les matières qui seront épandues sur son exploitation, ni les prestations de transport et d'épandage.

Ce principe permet au SIAAP de maîtriser l'ensemble de la filière, de l'usine jusqu'à la parcelle. Le SIAAP, via son prestataire, missionne pour le transport et l'épandage des entreprises locales, spécialisées dans ce type de prestations. Ces entreprises sont agréées par le prestataire du SIAAP. Elles font l'objet d'une évaluation annuelle et leurs prestations sont contrôlées par les techniciens en charge de la filière, afin de garantir la qualité des prestations réalisées.

4.12.2 Répartition des communes soumises à enquête publique

Cette partie est développée dans le chapitre 4.10.1 *La constitution du périmètre d'épandage* du thème 10 : l'aptitude de certains sols.

4.12.3 Réglementation sur les enquêtes publiques

L'enquête publique pour l'épandage des boues de Seine aval du SIAAP en Eure-et-Loir a été organisée conformément aux dispositions prévues par le code de l'environnement et notamment les articles L123-1 à L123-16 et R123-9 à R123-13 modifiés par l'ordonnance n°2016-1060 du 3 août 2016 et par le décret n°2017-626 du 25 avril 2017. Ceux-ci prévoient :

Publication de l'avis dans 2 journaux :

- *"I. - Un avis portant les indications mentionnées à l'article R. 123-9 à la connaissance du public est publié en caractères apparents quinze jours au moins avant le début de l'enquête et rappelé dans les huit premiers jours de celle-ci dans deux journaux régionaux ou locaux diffusés dans le ou les départements concernés."*

→ Publication d'un avis dans *Echo Républicain* le 07/09/2019 et le 28/09/2019

→ Publication dans *Horizon* le 06/09/2019 et le 27/09/2019

Affichage de l'avis dans les mairies concernées :

- *"III. - L'autorité compétente pour ouvrir et organiser l'enquête désigne le ou les lieux où cet avis doit être publié par voie d'affiches et, éventuellement, par tout autre procédé. Pour les projets, sont au minimum désignées toutes les mairies des communes sur le territoire desquelles se situe le projet ainsi que celles dont le territoire est susceptible d'être affecté par le projet. Pour les plans et programmes de niveau départemental ou régional, sont au minimum désignées les préfetures et sous-préfetures."*
- *"Cet avis est publié quinze jours au moins avant l'ouverture de l'enquête et pendant toute la durée de celle-ci."*

→ Contrôle terrain avec rapport (cf. annexe 2) par le prestataire du SIAAP de la mise en place des affiches les 9 et 10 septembre 2019

Affichage de l'avis sur les lieux de réalisation du projet (parcelles)

- *“IV. - En outre, dans les mêmes conditions de délai et de durée, et sauf impossibilité matérielle justifiée, le responsable du projet procède à l'affichage du même avis sur les lieux prévus pour la réalisation du projet.”*
- *“Ces affiches doivent être visibles et lisibles de la ou, s'il y a lieu, des voies publiques, et être conformes à des caractéristiques et dimensions fixées par arrêté du ministre chargé de l'environnement.”*

→ **Mise en place par la société Publilegal (déléguée par le SIAAP) d'au moins une affiche au format A2 jaune par commune sur une parcelle du projet avec rapport (cf. annexe 3), conformément au courrier du 3 juin 2019 de la DDT**

Mise à disposition du dossier d'enquête publique et des registres :

- *“II. - Un dossier d'enquête publique est disponible en support papier au minimum au siège de l'enquête publique.”*
- *“Ce dossier est également disponible depuis le site internet mentionné au II de l'article R. 123-11.”(site internet de l'autorité compétente)*
- *“Le dossier d'enquête publique est mis en ligne pendant toute la durée de l'enquête. Il reste consultable, pendant cette même durée, sur support papier en un ou plusieurs lieux déterminés dès l'ouverture de l'enquête publique. Un accès gratuit au dossier est également garanti par un ou plusieurs postes informatiques dans un lieu ouvert au public.”*
- *“Les observations et propositions du public peuvent également être adressées par voie postale ou par courrier électronique au commissaire enquêteur ou au président de la commission d'enquête.”*

→ **Mise à disposition du dossier de demande d'autorisation complet au format papier et informatique dans les 7 communes de permanence**

→ **Mise à disposition du dossier de demande d'autorisation simplifié au format papier et complet au format informatique dans les 67 autres communes**

→ **Consultation du dossier depuis un poste informatique à la mairie de Mainvilliers (siège d'enquête)**

→ **Mise à disposition du dossier en version électronique sur 2 sites internet : <http://siaap-perimetre28-epandage-boues.enquetepublique.net/> et <https://www.projets-environnement.gouv.fr>**

→ **Mise en place d'un registre dématérialisé toute la durée de l'enquête par Publilegal (déléguée par le SIAAP)**

→ **Mise en place de 7 registres au format papier dans les communes de permanence**

→ **Organisation de 21 permanences avec présence d'au moins un des membres de la commission d'enquête pour recueillir les observations**

→ **Envoi possible des observations par courriers à la mairie de Mainvilliers et sur une adresse électronique**

4.12.4 La communication menée par le SIAAP

Le SIAAP a largement communiqué sur son projet en amont de l'enquête publique. Cette phase de communication est présentée dans le *chapitre 3 : Bilan de la phase de communication*.

4.12.5 Prise en compte des contraintes environnementales

Le captage évoqué dans l'observation OBS R7 Bo en bordure de la parcelle 2801745001 est abandonné comme précisé dans le chapitre *4.10.5 Épandage en PPC* du thème 10 : "L'aptitude de certains sols."

Les risques liés à la présence de marnières évoqué dans la même observation sont précisés dans le chapitre *4.10.3 La prise en compte des marnières et bétoires* du même thème cité précédemment.

5 Les questions formulées par la commission d'enquête

La commission d'enquête a formulé des questions complémentaires aux sujets évoqués dans les thèmes. Les éléments de réponses sont présentés sous chaque question reprise dans l'ordre (encadré bleu dans le texte).

- L'arrêté préfectoral du 11 juillet 2019 organisant l'enquête publique cite la demande d'autorisation déposée le 8 juin 2018 présentée par Monsieur le président du SIAAP. Or, le classeur n°1 du dossier qui présente la demande ne comporte aucune lettre datée du début juin 2018. De plus, le document n°1 « DEMANDE » est une version 2 de décembre 2018. Il est demandé de produire la lettre de demande du président du SIAAP de juin 2018 ainsi que la correspondance qui a transmis la demande version 2 de décembre 2018.

Vous trouverez en annexe 4 les courriers demandés, à savoir :

- le courrier de dépôt du SIAAP du dossier de demande d'autorisation en date du 6 juin 2018,
- le courrier de la DDT en date du 6 juillet 2018 demandant le dépôt d'un dossier définitif suite aux compléments demandés,
- le courrier de dépôt du SIAAP du dossier de demande d'autorisation définitif en date du 28 novembre 2018.

- Validation de la demande de renouvellement d'autorisation : Les dossiers des classeurs 1 et 2 ont été établis et approuvés par la SEDE respectivement les 5 et 6 novembre 2018, validés par le SIAAP le 27 novembre 2018. Or, les documents d'étude préalable et d'étude d'impact sont des versions 2 de décembre 2018, soit postérieurs aux approbations et validations. Comment s'explique cette anomalie chronologique?

Les dates de validation du dossier ne correspondent effectivement pas à quelques jours près au mois de version du dossier. Cela peut s'expliquer par les délais de relecture, de validation du dossier, de signature du courrier de dépôt qui ont été mal anticipés, ainsi que de la prévision du mois de dépôt du dossier en main propre à la DDT en décembre 2018.

- Dans le document 5 du classeur 1 « Etude préalable », en page 107, il est fait mention du suivi renforcé du phosphore : « L'étude aboutira à une meilleure connaissance du comportement du phosphore apporté par les boues dans les sols sur le moyen terme. L'essai se terminera fin 2018 ». Quels sont les résultats obtenus ?

Afin d'approfondir les connaissances sur la dynamique du phosphore dans les sols suite à l'apport de boues de Seine aval, le SIAAP a mis en place un dispositif expérimental, pour une durée de trois ans, en partenariat avec l'Institut Polytechnique LaSalle Beauvais et SEDE Environnement.

Le phosphore est l'élément fertilisant majeur apporté par les boues thermiques de Seine aval. Contrairement à l'azote, le comportement de cet élément dans le sol, suite à un apport organique, reste peu connu. De ce fait, le SIAAP a réalisé plusieurs études depuis 2001 portant sur cet élément :

- Tests de biodisponibilité du phosphore à court terme en 2001 et 2006 : ces tests ont permis de fixer la valeur fertilisante immédiate du phosphore à 75 % dans les boues de Seine aval. Cela signifie qu'un apport de phosphore par les boues de Seine aval représente 75 % de l'effet fertilisant d'un apport similaire de phosphore minéral, la première année.
- Suivi de fermes pilotes de 2004 à 2010 : ce suivi avait pour objectif de mesurer l'impact des apports de boues de Seine aval dans le temps, sur la teneur en phosphore des sols après plusieurs épandages. Les résultats n'ont pas montré d'enrichissement significatif des sols en phosphore.

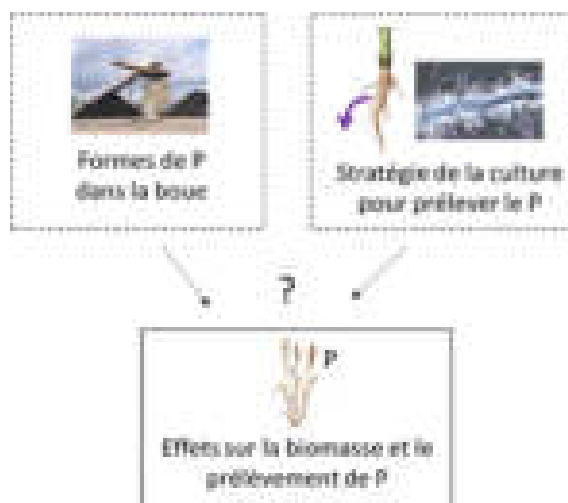
Le SIAAP a poursuivi sa démarche en élaborant un dispositif expérimental complet, sur une parcelle unique, dont les paramètres sont contrôlés (fertilisation, dose d'épandage, dates d'intervention, analyses...), afin d'obtenir des données pouvant être traitées statistiquement. Ce dispositif vise à :

- préciser la dynamique du phosphore des boues thermiques de Seine aval dans le sol et affiner les connaissances sur sa disponibilité pour la nutrition des cultures à l'échelle d'une rotation culturale;
- évaluer le comportement, et en particulier la dynamique du phosphore, pour des boues traitées selon différents procédés : traitement thermique, centrifugation et compostage.

Pour ce projet, le SIAAP et son prestataire SEDE Environnement en charge de la mise en œuvre de la filière d'épandage, ont établi un partenariat avec l'Institut Polytechnique LaSalle-Beauvais, afin de disposer des moyens et du savoir-faire de personnel de recherche spécialisé pour la réalisation des analyses et l'accompagnement de l'interprétation des résultats.

L'objectif principal du projet STEPHOR est de déterminer si les boues produites par la station d'épuration Seine aval du SIAAP peuvent constituer des fertilisants en phosphore pour les cultures.

Réaliser cet objectif nécessite de déterminer les facteurs expliquant la disponibilité du P et son prélèvement par les plantes dans les sols fertilisés avec les boues. Les deux principaux facteurs étudiés dans ce projet sont le fractionnement du phosphore (P) dans les boues, qui reflète différentes formes de P contenues dans les boues, et les stratégies mises en place par les plantes pour augmenter le prélèvement de P.



L'impact des boues sur la disponibilité du P peut fortement varier selon le type de sol. Trois types de sol représentatifs des sols cultivés de la région ont donc été étudiés : un brunisol⁷⁰, un calcosol⁷¹ et un luvisol⁷². L'impact des boues sur le prélèvement de P pouvant également varier selon la plante, trois espèces cultivées dans la région ont été étudiées : l'orge, le colza et le blé.

Trois principales études ont été menées au cours du projet :

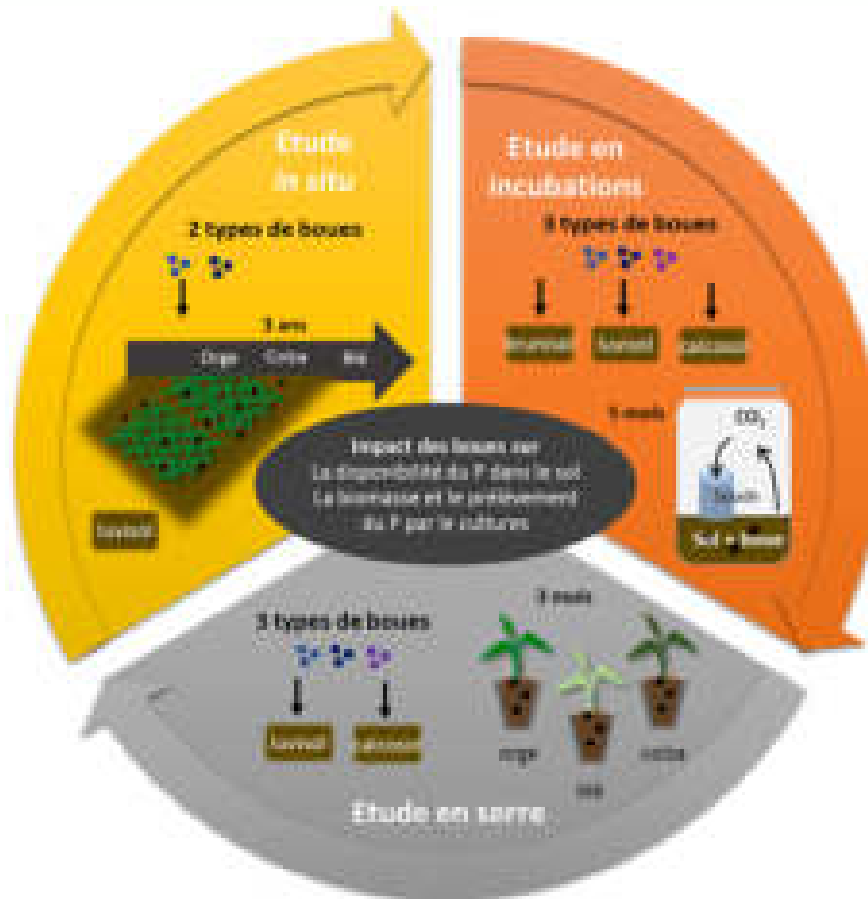


Figure 19: Projet STEPHOR

Ces trois études se sont déroulées de septembre 2015 à juillet 2018.

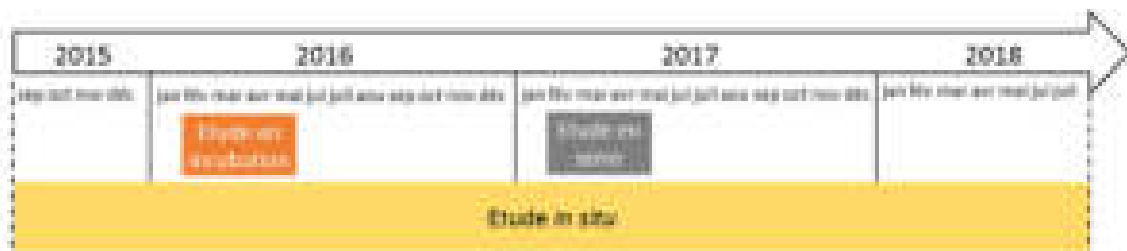


Figure 20: Chronologie des trois études

⁷⁰ Brunisol : Type de sol fréquemment rencontré en zone tempérée. Sol évolué, très présent sur le territoire français.

⁷¹ Calcosol : Type de sol très riche en calcaire, argileux, au pH élevé. Sol très présent dans la région Hauts de France.

⁷² Luvisol : Type de sol argilo-limoneux, comprenant des horizons assez différenciés. Sol généralement assez profond, très présent dans la région Hauts de France.

Essai in situ (effet des boues en conditions réelles)

Présentation

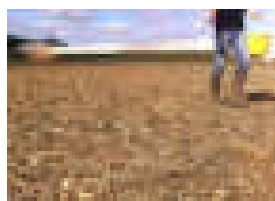
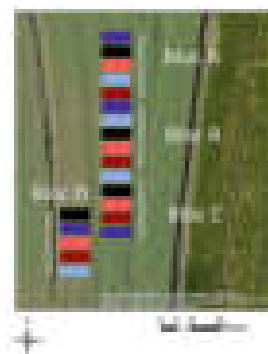


La **première étude** est basée sur une **expérimentation de plein champ**, comparant deux types de boues produites par la station d'épuration, une thermique et une centrifugée compostée, ainsi qu'un engrais minéral. Un apport a eu lieu au début d'une rotation orge, colza, blé menée sur trois ans. Les formes de P contenues dans les boues ont été déterminées. Le P disponible du sol, la biomasse et le P prélevé par les cultures sont déterminés au cours du temps.

Cette première étude permet donc de déterminer l'impact des boues à court terme sur la disponibilité du P et le prélèvement de P en conditions réelles. Les résultats de cette étude ont fait l'objet de publication scientifique dans des journaux internationaux (Annexe 5).

Un dispositif en plein champ a été mis en place en septembre 2015, sur une parcelle en limon sur craie gérée par la ferme expérimentale de l'UniLaSalle Beauvais. Il est constitué de 20 placettes de 4 x 10 m, faisant l'objet de 5 traitements différents (4 placettes par traitement) :

- apport de boues thermiques filtres-presses de Seine aval à la dose agronomique ;
- apport d'engrais phosphatés (super46) équivalent à l'apport de phosphore réalisé par l'apport de boues thermiques de Seine aval ;
- apport de composts de boues centrifugées (non thermiques) de Seine aval à la dose agronomique ;
- apport d'engrais phosphatés (super46) équivalent à l'apport de phosphore réalisé par l'apport de composts de boues centrifugées de Seine aval ;
- témoin sans apport de phosphore.



Les apports de boues thermiques, composts de boues centrifugées et Super46 (engrais minéral) ont eu lieu le 16 septembre 2015, sur les placettes correspondantes. Le suivi analytique, permettant de suivre la dynamique du phosphore, a débuté suite à l'épandage. Il s'est achevé en juillet 2018 à la récolte du blé, trois ans après l'épandage, puis finalisé au printemps 2019 avec l'interprétation de l'ensemble des mesures.

Conclusion

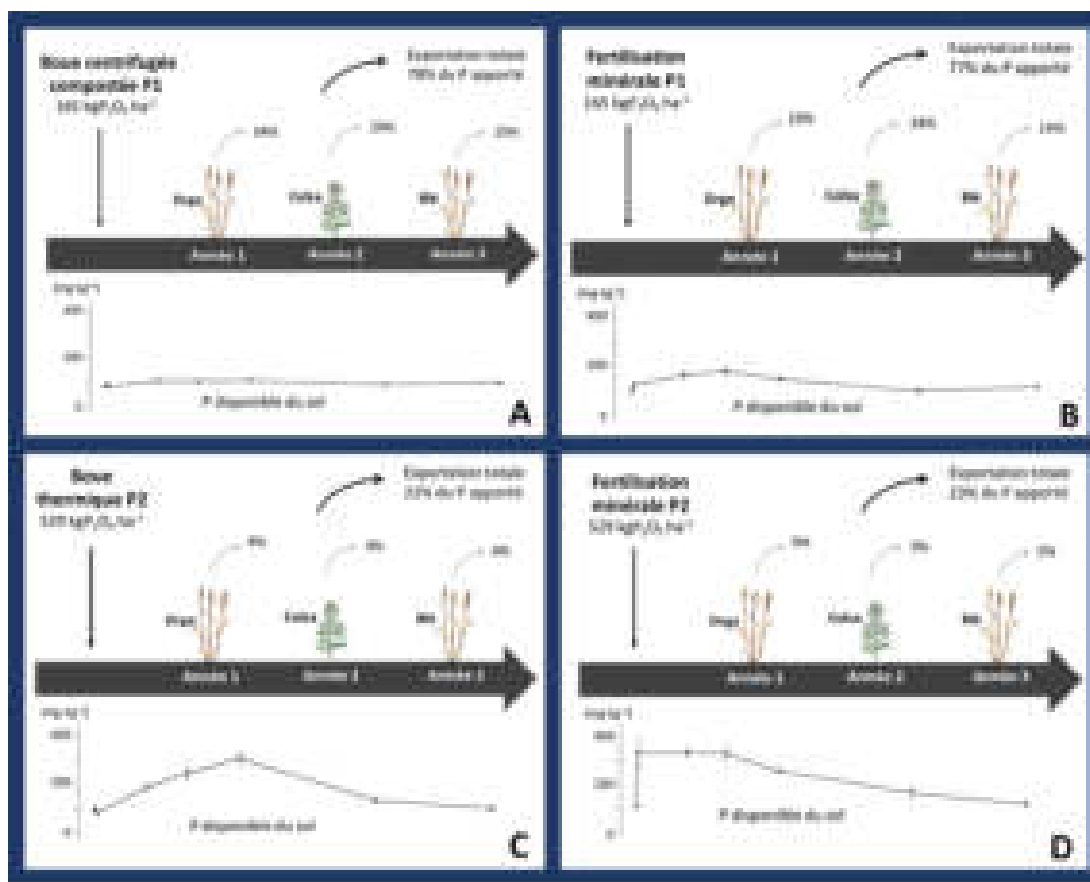


Figure 21: Bilan des exportations de phosphore par les cultures (dans les grains) par rapport à la quantité de phosphore apporté, et évolution du P disponible (P-résine + P NaHCO₃) dans le sol

Les deux boues ont un impact différent sur le fractionnement et la disponibilité du phosphore dans le sol. La boue centrifugée compostée n'augmente pas le P disponible du sol, ce qui peut être dû à sa forte proportion de P apatitique (P lié au Ca), qui est une forme de P peu soluble. En revanche, la boue thermique augmente progressivement le P disponible du sol au cours de la première année d'expérimentation. Cette augmentation peut d'une part être due à l'apport de P organique et sa progressive minéralisation⁷³ au cours du temps, et d'autre part à la stimulation de l'activité des microorganismes du sol, engendrant une augmentation de la minéralisation du P organique initialement présent. Les résultats de cette étude suggèrent ainsi que **les boues riches en P organique permettent d'augmenter progressivement le P disponible du sol.**

Un an après les apports, la teneur en P disponible du sol est équivalente avec la boue thermique et la fertilisation minérale apportée à la même dose de P. Cependant, contrairement à l'apport de boue qui engendre une augmentation progressive, la fertilisation minérale engendre une augmentation très rapide de la teneur en P disponible du sol. Les deux types d'apports peuvent ainsi être complémentaires pour apporter le phosphore au cours d'une culture. Un apport simultané en tête de rotation serait donc à

⁷³ Minéralisation : Processus correspondant à la dégradation de molécules organiques (contenant du carbone) en plus petites molécules non organiques. La minéralisation du phosphore correspond ainsi à la dégradation du phosphore organique en phosphore inorganique et peut être réalisé par les microorganismes. La minéralisation peut également avoir lieu dans la solution du sol (Partie liquide du sol, constituée d'eau et d'éléments dissous, comme des ions, des molécules organiques, des enzymes) grâce aux enzymes phosphatases. Le processus opposé est l'immobilisation.

privilégier : un fertilisant minéral contenant du P très soluble et augmentant très rapidement le P disponible pour les premiers stades de développement des cultures, et une boue riche en matière organique, augmentant progressivement le P disponible pour les stades plus tardifs de croissance.

Les processus contrôlant la disponibilité du phosphore dans les sols fertilisés avec les boues peuvent varier selon le type de sol. Ainsi, l'impact d'une boue sur le P disponible du sol dépend des formes de P qu'elle contient, mais peut également varier selon le type de sol sur lequel elle est apportée. Il est donc primordial d'étudier l'impact des boues sur différents types de sol (expérimentation en incubation), afin de pouvoir extrapoler les résultats de l'étude *in situ*.

Ce qu'il faut retenir de l'essai *in situ*...

Impact de l'apport de boues sur le pH du sol

- L'apport des boues ne modifie pas le pH du sol au cours des 3 années d'expérimentation.

Impact de l'apport de boues sur la disponibilité du phosphore dans le sol

- Le P disponible du sol varie en fonction de la modalité de fertilisation.
- Contrairement à la boue centrifugée (non thermique) compostée, l'apport de boue thermique augmente progressivement le P disponible du sol.
- L'apport de fertilisant minéral augmente rapidement le P disponible du sol.

Impact de l'apport de boues sur le fractionnement du phosphore dans le sol

- Le fractionnement du P dans les boues influence le fractionnement du P dans le sol.
- La faible dissolution du P apatitique apporté en majorité avec la boue centrifugée (non thermique) compostée peut expliquer son absence d'effet sur le P disponible.

Impact de l'apport de boues sur l'activité biologique des sols

- Les boues n'ont pas eu d'impact négatif sur les communautés lombriciennes, indicatrices de présence d'éléments toxiques dans les sols.

Impact de l'apport de boues sur la biomasse des cultures

- Le P organique apporté avec la boue thermique peut participer à l'augmentation du P disponible dans le sol.
- L'apport de boue thermique stimule l'activité des microorganismes du sol, ce qui peut augmenter la minéralisation du P organique initialement présent dans le sol et participer à l'augmentation du P disponible.
- Le P ne semble pas limitant pour la croissance des cultures.
- L'apport de boue ne modifie pas la biomasse des trois cultures, quel que soit le stade de croissance.

Impact de l'apport de boues sur le prélèvement de phosphore par les cultures

- L'apport de boue influence peu la biomasse et le prélèvement de phosphore des trois cultures.
- L'apport de fertilisant minéral à la plus forte dose (P2) augmente la biomasse et le P prélevé uniquement chez le colza.

Bilan des exportations de phosphore par les cultures

- Les apports des deux boues en tête de rotation semblent pouvoir couvrir les besoins en P des trois cultures, la dose P2 les dépassant largement.
- L'exportation du P par les cultures est équivalente avec les boues et le fertilisant minéral apporté à la même dose de P.

Expérimentation en incubation (Effet des boues sur différents sols)

Présentation

La **seconde étude** est basée sur une **expérimentation d'incubation au laboratoire**, consistant à suivre en conditions contrôlées l'évolution de mélanges de sol et de boue pendant cinq mois. Trois types de sols : brunisol, calcosol et luvisol, et trois types de boues de la station d'épuration : boue centrifugée compostée (boue non thermique), boue thermique filtre-pressée, et boue thermique compostée, ont été testés. Une modalité avec un fertilisant minéral et une modalité sans apport de P ont également été intégrées.

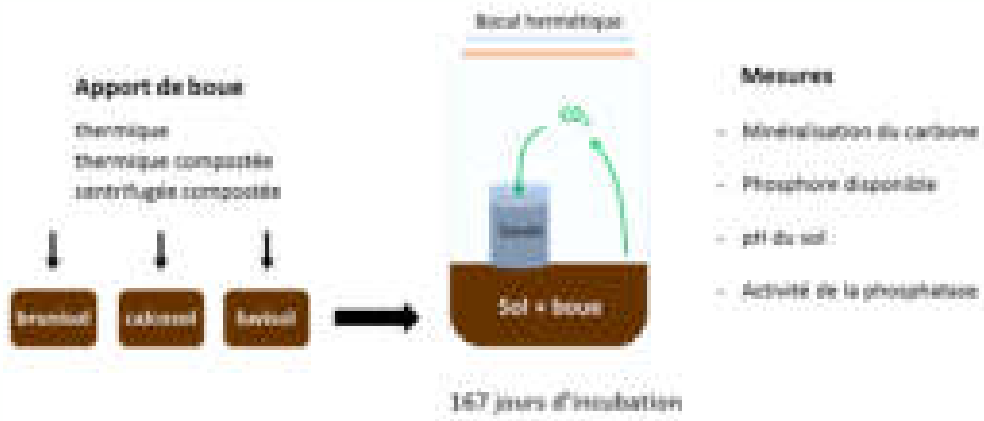
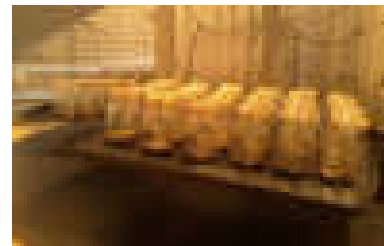


Figure 22: Incubation réalisée au laboratoire

La minéralisation des boues a été mesurée au cours du temps. La disponibilité du P, les principaux paramètres du sol, et l'activité de l'enzyme phosphatase⁷⁴ alcaline ont été mesurés à la fin de l'incubation. Cette étude permet ainsi de déterminer l'impact des boues produites par la station d'épuration sur la disponibilité du P dans les différents types de sol de la région, et de comprendre les mécanismes impliqués.

⁷⁴ Phosphatase : Enzyme permettant la dégradation de phosphore organique en phosphore inorganique. On distingue la phosphatase acide, qui peut être libérée par les racines des plantes et qui est plus efficace en milieu acide, de la phosphatase alcaline, qui peut être libérée par les microorganismes et qui est plus efficace en milieu alcalin.

Conclusion

L'objectif de cette seconde étude était de déterminer l'impact de l'apport de différentes boues produites par la station d'épuration Seine aval sur la disponibilité du phosphore dans trois types de sol de la région (brunisol, calcosol et luvisol). Cette étude est basée sur une expérimentation à court-terme (cinq mois) au laboratoire. Les résultats montrent que les boues augmentent le P disponible, c'est-à-dire le P potentiellement assimilable par les plantes, dans les trois types de sol étudiés. Le traitement des boues à la station d'épuration semble peu influencer l'impact des boues sur le P disponible. Pour toutes les boues, l'augmentation du P disponible est plus faible qu'avec un fertilisant minéral. Ces résultats suggèrent donc qu'à court terme, l'apport de boue n'est pas aussi efficace qu'un apport de fertilisant minéral pour fournir du P potentiellement assimilable par les cultures.

Ces résultats sont en accord avec ceux de la première étude réalisée en champ sur un luvisol. Cette première étude montrait que le P disponible augmentait avec l'apport de boue, mais était plus faible qu'avec un fertilisant minéral, du moins sur le court terme. La présente étude confirme donc l'impact des boues sur le P disponible à court terme sur le luvisol, et montre qu'on retrouve un effet équivalent sur le calcosol et le brunisol.

Le P disponible est indicateur du P que la plante peut prélever. Dans les sols avec peu de P disponible, les plantes sont néanmoins capables de mettre en place des stratégies racinaires leur permettant d'augmenter la quantité de P prélevé. Il est ainsi nécessaire de vérifier si l'augmentation de P disponible induite par l'apport de boue correspond à une augmentation du P prélevé par les plantes.

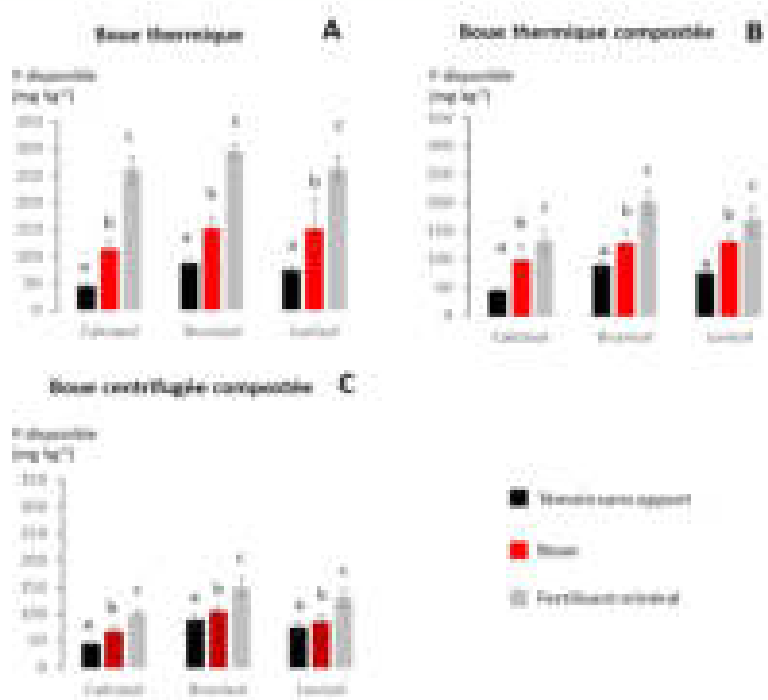


Figure 23: Phosphore disponible (P-résines + P-NaHCO₃) dans les sols fertilisés avec les boues ou le fertilisant minéral (super 46) dans les trois types de sol, après 167 jours d'incubation

La dose de P apportée était différente selon les boues, trois modalités minérales correspondant à la dose de P apportée avec chaque boue ont donc été réalisées. Pour chaque graphique (A, B et C), la boue est comparée à la modalité minérale apportant la même dose de P. Les lettres correspondent aux différences significatives ($p < 0,5\%$) entre les fertilisations pour chaque sol.

Ce qu'il faut retenir de l'expérimentation en incubation...

Minéralisation des boues selon le type de sol

- La minéralisation correspond à la dégradation des molécules organiques par les microorganismes.
- La minéralisation des boues change selon le type de sol.
- La minéralisation est plus forte dans un sol riche en carbone organique, comme le calcosol.
- Les boues compostées minéralisent moins que les boues non compostées.

Impact de l'apport des boues sur le phosphore disponible des sols

- Le phosphore disponible représente le P potentiellement assimilable par la plante.
- Les trois boues permettent d'augmenter le P disponible dans tous les sols étudiés.
- Le P disponible est plus fort avec le fertilisant minéral qu'avec les boues.
- La boue thermique compostée est celle qui a la plus forte valeur fertilisante dans les trois sols après 6 mois d'incubation.

Impact des boues sur le pH des sols

- L'impact des boues sur le pH du sol est important à déterminer, car le pH peut influencer la disponibilité de nombreux éléments nutritifs, dont le phosphore.
- L'apport de boues modifie globalement peu le pH dans les trois sols.

Impact des boues sur l'activité de la phosphatase dans les sols

- La phosphatase est une enzyme produite par les microorganismes permettant de transformer les molécules de P organique en P pouvant être assimilé par les plantes.
- L'impact des boues sur l'activité de la phosphatase dépend du type de sol.
- Les trois boues augmentent l'activité dans les sols à fort pH, comme le calcosol et le luvisol.
- Les boues ne changent pas l'activité de la phosphatase dans un sol à faible pH, comme le brunisol.

Expérimentation en serre (Effet des boues sur les trois cultures)

Présentation



La **troisième étude** est **basée sur une expérimentation de croissance de plantes en serre**. Trois espèces, orge, colza et blé ont été cultivées séparément sur des mélanges de sol et de boue pendant trois mois. Deux types de sol : calcosol et luvisol, et trois types de boues de la station d'épuration : boue centrifugée (non thermique) compostée, boue thermique, et boue thermique compostée, ont été testés.

Une modalité avec un fertilisant minéral et une sans apport de P ont également été intégrées. La disponibilité du P dans les sols, la biomasse et le P prélevé par les plantes ont été déterminés en fin de croissance. D'autres analyses, comme le développement de mycorhizes⁷⁵ et la production de carboxylates⁷⁶ ont également été réalisées. Cette étude permet d'une part de déterminer l'impact des boues sur la disponibilité du P dans les sols et le prélèvement de P par les plantes, et d'autre part de déterminer les stratégies mises en place par les différentes plantes afin d'augmenter le prélèvement de P.

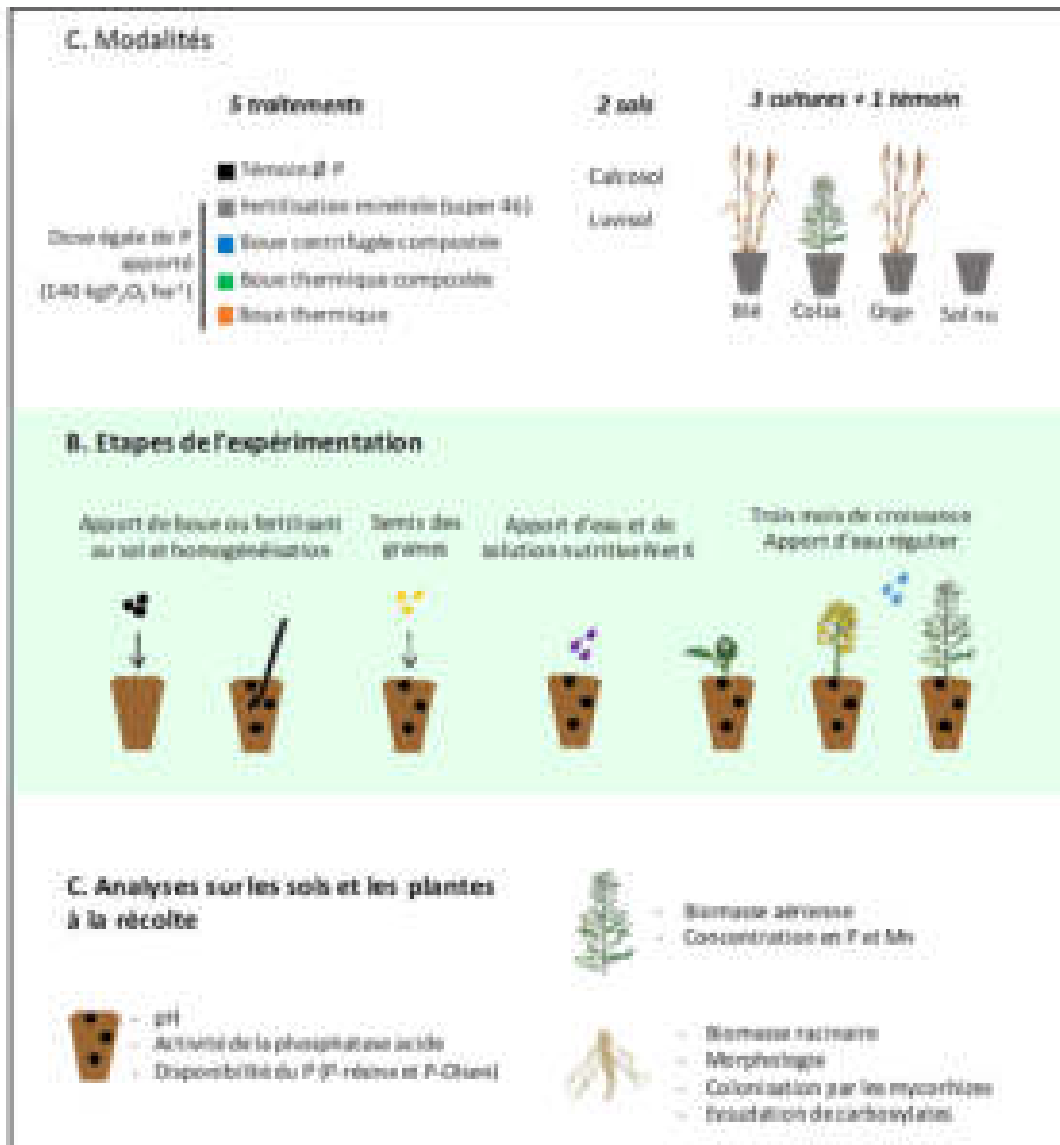


Figure 24: réalisation de l'expérimentation en serre

⁷⁵ Mycorhize : Association symbiotique entre un champignon mycorhizien et la racine d'une plante. Le champignon permet à la plante d'explorer un plus grand volume de sol et donc d'augmenter le prélèvement d'éléments nutritifs comme le phosphore, alors que la plante fournit au champignon des sucres issus de la photosynthèse.

⁷⁶ Carboxylates : Molécule carbonée de petite taille pouvant être libérée dans le sol par les racines des plantes. Les carboxylates s'apparentent aux ions phosphates et il peut se produire un échange entre carboxylates en solution et ions phosphates sorbés à la surface des minéraux. Ainsi, plus il y a de carboxylates libérés, plus il y a de phosphates pouvant être prélevés par les racines.

Conclusion

L'apport de boues ou d'engrais minéral augmente de façon équivalente la biomasse des cultures (blé, colza et orge) dans le calcosol. Dans le Luvisol, la fertilisation avec les boues ou l'engrais minéral a peu d'effet sur la biomasse des cultures à court terme, car le sol est initialement assez riche en phosphore disponible. Néanmoins, dans le cas d'apports espacés de plusieurs années, une absence de fertilisation en P pourrait limiter la biomasse des cultures. La dose de fertilisant à apporter, que ce soit sous forme de boue ou d'engrais minéral, devrait ainsi être adaptée au type de sol et à sa teneur initiale en P disponible.

Le colza est la culture qui prélève le plus de phosphore dans les sols fertilisés avec les boues. Ainsi, lors d'une rotation orge-colza-blé, classique dans la région nord, l'apport de boue est le plus pertinent avant la culture de colza. Dans le calcosol, le colza prélève plus de phosphore dans les sols fertilisés avec les boues que dans le sol fertilisé avec l'engrais minéral. **Les trois boues étudiées peuvent donc constituer un fertilisant en phosphore plus efficace qu'un engrais minéral pour le colza.**

La stratégie mise en place par le colza permettant de prélever plus de phosphore dans les sols fertilisés avec les boues est la libération de phosphatase acide par les racines. La fertilisation en phosphore avec les boues serait donc particulièrement efficace pour les cultures capables de libérer de fortes quantités de cette enzyme. Cette capacité semble être commune aux plantes appartenant comme le colza à la famille des brassicacées, telles que le chou ou le radis. Des plantes appartenant à d'autres familles sont également connues pour libérer de fortes quantités de phosphatase, c'est notamment le cas du lupin et de la tomate (Tadano and Sakai, 1991 ; Li et al., 1997).

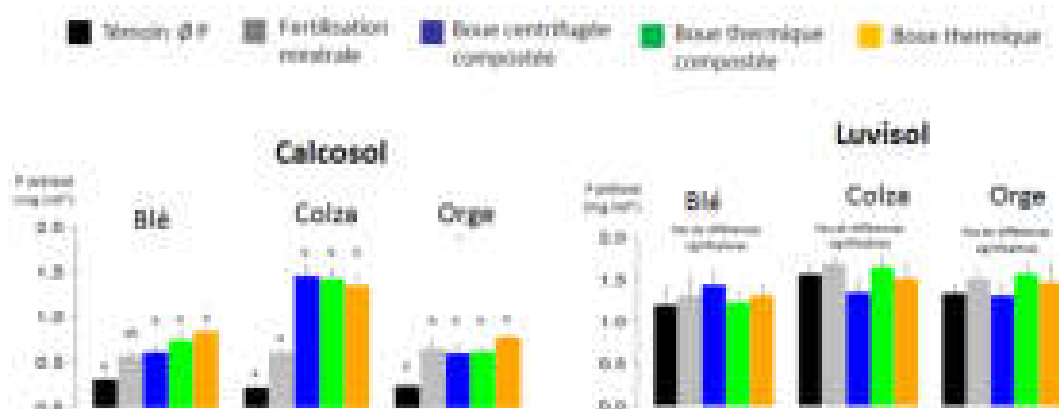


Figure 25: Phosphore prélevé par le blé, le colza et l'orge après trois mois de croissance dans le calcosol et le luvisol fertilisés avec les boues ou l'engrais minéral.

Les lettres correspondent aux différences significatives ($p < 0,5\%$) entre les fertilisations pour chaque culture.

Ce qu'il faut retenir de l'expérimentation en serre...

Impact des boues sur la biomasse⁷⁷ des cultures

- L'apport de boues ou d'engrais minéral augmente de façon équivalente la biomasse des cultures dans le calcosol, initialement pauvre en P disponible.
- Le type de boue apporté influence peu la biomasse des cultures.
- Dans le luvisol initialement riche en P disponible, l'apport de boue ou d'engrais minéral n'augmente pas la biomasse des cultures.

Impact des boues sur le prélèvement de phosphore par les cultures

- Les boues peuvent constituer un fertilisant en phosphore plus efficace que l'engrais minéral pour le colza.
- Le colza prélève plus de P avec les boues qu'avec l'engrais minéral dans le calcosol.
- Le colza est la culture qui prélève le plus de P dans le calcosol.
- Le type de boue apportée influence peu le prélèvement de P.

Stratégies associées au prélèvement de phosphore selon la culture

- La stratégie associée au plus fort prélèvement de phosphore est la libération de phosphatase acide par les racines.
- Le colza est la culture qui libère le plus de phosphatase acide dans les deux sols (Calcosol et luvisol).
- La libération de phosphatase acide est plus forte dans un sol pauvre en P disponible, ce qui permet d'augmenter le prélèvement de P par les cultures.

Stratégies associées au prélèvement de phosphore selon la fertilisation

- Le colza prélève plus de phosphore dans les sols fertilisés avec les boues qu'avec l'engrais minéral, car les boues apportent du phosphore organique.
- Plus la teneur en P organique dans le sol est forte, plus la phosphatase acide libérée par le colza peut minéraliser du P organique (Po)⁷⁸ en P inorganique (Pi)⁷⁹, qui peut être prélevé par la plante.

⁷⁷ Biomasse : Masse de plantes récoltées. On distingue la biomasse fraîche (le jour de la récolte) et la biomasse sèche (après séchage à l'étuve à 60/70°C pendant 48h). La biomasse sèche est souvent plus intéressante car elle correspond à la masse réelle de la plante, sans prendre en compte sa teneur en eau. Généralement, la biomasse fait ainsi référence à la biomasse sèche.

⁷⁸ P organique (Po) : Molécule de phosphore contenant du carbone, par exemple l'acide phytique. Le Po doit être minéralisé en Pi afin de pouvoir être prélevé par les racines.

⁷⁹ P inorganique (Pi) : Molécule de phosphore ne contenant pas de carbone, par exemple les ions (ortho)phosphates (H₂PO₄⁻, HPO₄⁻) qui sont les seules formes de P que les racines peuvent prélever, ou les polyphosphates.

Ce qu'il faut retenir du projet STEPHOR...

Conclusion générale

Les boues produites par la station d'épuration Seine aval du SIAAP peuvent constituer des fertilisants en phosphore pour les cultures. L'ensemble des résultats montre que **les trois types de boues étudiées**, à savoir la boue centrifugée (non thermique) compostée, la boue thermique et la boue thermique compostée, **permettent d'augmenter la teneur en P disponible des sols**. L'évolution du P disponible dans les sols fertilisés avec les boues diffère de celle des sols fertilisés avec un fertilisant minéral. L'apport de fertilisant minéral engendre en effet une brusque augmentation de la teneur en P disponible, alors que les boues engendrent une augmentation progressive.

L'impact de l'apport de boues sur la disponibilité du P dans le sol dépend des formes de P qu'elles contiennent. L'ensemble des résultats suggèrent que le P organique apporté avec les boues, en étant minéralisé dans le sol, permet progressivement d'augmenter le P disponible. En revanche, le P minéral sous forme apatitique apporté avec les boues semble peu contribuer à l'augmentation du P disponible. Ces résultats suggèrent **qu'une boue ayant une forte proportion de P organique et une faible proportion de P apatitique sera plus efficace pour augmenter le P disponible du sol**.

Etude	Facteur	Fractionnement du P dans le sol	Disponibilité du P dans le sol	Prélèvement de P par les cultures
Etude in situ	Forme de P dans les boues	+	+	-
	Type de culture	-	-	-
Etude en incubation	Forme de P dans les boues	-	+	NA
	Type de sol	***	+	NA
Etude en sème	Forme de P dans les boues	NA	-	-
	Type de sol	NA	***	***
	Type de culture	NA	***	***

*** Effet fort
 + Effet faible
 - Pas d'effet
 NA non étudié

Figure 26: Synthèse des effets observés pour chaque étude

La disponibilité et le fractionnement du phosphore⁸⁰ dans le sol varie fortement selon le type de sol. L'impact des boues varie en fonction de cette disponibilité et de ce fractionnement initial. L'augmentation du P disponible suite à l'apport de boues est plus forte lorsqu'elles sont apportées sur un sol initialement carencé en phosphore.

L'impact de l'apport de boues sur le prélèvement de phosphore varie selon la culture. Comparé au blé et à l'orge, le colza est la culture qui parvient à prélever le plus de P dans les sols fertilisés avec les

⁸⁰ Fractionnement du phosphore : Classement du phosphore présent dans un milieu, comme un sol ou une boue, en fonction de sa disponibilité. Des extractions successives réalisées avec différents solvants chimiques permettent d'obtenir ce fractionnement.

boues. L'apport de boues peut engendrer un prélèvement de P par le colza supérieur à l'apport d'un fertilisant minéral. Les résultats suggèrent que le colza favorise la minéralisation du P organique apporté avec les boues ; **les boues ayant une forte teneur de P organique semblent donc être les plus efficaces pour fournir du P au colza.**

Conséquences sur les pratiques de fertilisation avec les boues

Concernant les pratiques de fertilisation, il paraît judicieux d'effectuer un apport complémentaire d'un fertilisant minéral contenant du P très soluble et d'une boue en tête de rotation. Les deux types d'apport sont en effet complémentaires, le premier permettant de fournir instantanément du phosphore aux cultures et le second plus progressivement au cours du temps. Les proportions de boues et de fertilisant minéral à apporter changent selon le type de boue, le temps de retour de la fertilisation apportée par les boues.

Perspectives

Le SIAAP, en partenariat avec UniLaSalle Beauvais et SEDE, étudie la possibilité de la mise en place d'un système de conseil de dose d'apport à l'échelle d'un territoire en fonction de la quantité de phosphore disponible dans les boues, du type de sol et de sa teneur en phosphore disponible pour les plantes. Ce travail utiliserait les éléments enregistrés dans la base de donnée (analyse de sol, historique des épandages, géolocalisation des parcelles,...) depuis une trentaine d'année et la prise en compte des pratiques agricoles (rotation, type de fertilisation,...).

La composition des boues de Seine aval a évolué également au fil du temps, et en particulier du fait de la mise en place de nouvelles unités d'épuration sur le site de production.

En 2007, l'usine s'est vue équipée d'une unité de nitrification/dénitrification. Par la suite une unité de postdénitrification a été mise en service en 2012. En 2017, un nouveau prétraitement a été mis en place ainsi qu'un renforcement des unités de nitrification et de dénitrification.

Du fait de ces changements, le SIAAP souhaite que soit réitérée l'étude du potentiel agronomique de ces boues en 2020/2021.

Cette étude avait été réalisée en 2004 (Biodisponibilité du Soufre, du Magnésium, du Bore, du Potassium, du Phosphore), en 2006 avec quatre études complémentaires (étude de la minéralisation du carbone et de l'azote, appréciation de l'effet alcalinisant et évaluation de la biodisponibilité du phosphore), ainsi qu'en 2010 avec un suivi plus approfondi (caractérisation initiale du produit livré, cinétique de minéralisation du Carbone et de l'Azote, Indice de Stabilité Biologique de la Matière Organique, disponibilité du K et du B, biodisponibilité de P, Mg et S selon la méthode Chaminade, biodisponibilité des oligo-éléments (Cu, Zn, et Fe), Effet Alcalinisant par Incubation (EAI), analyse des paramètres issus du projet de révision de la Directive Européenne, test de phytotoxicité, test d'écotoxicité). De plus en 2001, une étude avait été réalisée sur la Biodisponibilité du Phosphore dans le cadre de la Thèse d'Armel Guivarch.

- Si le document d'étude d'impact comporte en finale une liste des sigles, les abréviations suivantes n'y figurent pas : SEDE, COPPENET, COMIFER et DOCOB. Quelles sont leur signification?

La signification des abréviations sont les suivantes :

- SEDE : Aujourd'hui, SEDE ne correspond plus à une abréviation mais au nom de la société en charge du suivi et de la réalisation des épandages commandités par le SIAAP conformément aux codes des marchés publics et à la réglementation en vigueur.
- COPPENET : Il s'agit de Marcel COPPENET, auteur d'ouvrage sur l'absorption de l'azote, du phosphore etc.
- COMIFER : il s'agit du COMIté français d'étude et de développement de la Fertilisation Raisonnée
- DOCOB : il s'agit d'un document d'objectifs de planification mis en oeuvre dans les sites Natura 2000 dans le cadre des directives européennes de protection "Habitats" et "oiseaux".

- Existe-t-il une pression de la part des agriculteurs pour recevoir des boues ? L'offre est-elle supérieure à la demande, en tenant compte de la situation actuelle de diminution consécutive de la quantité de boues séchées produites à épandre ?

Les prises de commandes auprès des agriculteurs sont réalisées de l'automne jusqu'au début du printemps. Les volumes prévisionnels de boues prévus pour la campagne d'épandage sont déjà connus. La baisse du volume de boues thermiques à disposition des agriculteurs pour la campagne d'épandage 2019 liée à l'incident sur les filtres presses a été communiquée aux agriculteurs par l'intermédiaire d'un courrier en date du 14/09/2018 et rappelée dans les lettres de la filière du 20/12/2018 et du 23/10/2019.

Les techniciens en charge des prises de commande se sont attachés à répartir équitablement les tonnages entre les agriculteurs afin que chacun puisse en bénéficier un minimum. Les agriculteurs ont ensuite complété leur fertilisation en fonction des tonnages prévisionnels de boues de Seine aval prévus pour la campagne d'épandage 2019.

Tous les ans, un potentiel d'épandage est calculé et actualisé en fonction de l'évolution des périmètres d'épandage, de l'intégration de nouveaux arrêtés d'autorisation, du temps de retour moyen et de la dose d'épandage. Il s'agit d'un potentiel théorique qui permet d'avoir une vision des tonnages maximales possibles d'être valorisés sur les 13 départements. Plusieurs paramètres ne sont pas maîtrisés comme la mise à disposition des parcelles par les agriculteurs en fonction de leur rotation, des cultures implantées, de l'historique de fertilisation...

A titre d'exemple, pour la campagne d'épandage 2019, le potentiel d'épandage était d'environ 105 000 tonnes et 35 000 tonnes ont été épandues. Dans le cas d'une demande des agriculteurs supérieure à la quantité de boues disponible, la pénurie de boue est gérée avec la réduction des prises de commande et dans le cas contraire, la filière du compostage est enclenchée pour valoriser les tonnages supplémentaires.

- Cas du refus de contrat d'achat de production avec un agriculteur par une société qui refuse une production résultant de l'épandage de boues. Quelle solution peut être trouvée, s'il y en a une ? La réglementation pour l'agriculture biologique est stricte. Une solution existe-elle entre l'épandage des boues et l'attribution du label « culture biologique » ?

Le refus des boues par certains industriels de l'agroalimentaire est présenté au chapitre *4.9 Thème 9 : Le refus de certains cahiers des charges, la réglementation européenne et sa pérennité*. Il n'existe pas à ce jour de solution pour pallier à cette situation.

Les boues épandues sur les parcelles agricoles le sont en substitution des engrais chimiques, avec des dosages maîtrisés en fonction des teneurs dans les boues (valeurs fertilisantes et éléments-traces) et des besoins des cultures. Les boues, pouvant contenir plusieurs agents chimiques et des métaux lourds, sont analysées et un suivi des sols est opéré. Au vu du principe de l'économie circulaire, la filière d'épandage répond aux critères écologiques, cependant, l'interdiction d'apport d'azote minéral dans le cahier des charges de l'agriculture biologique (règlement (CE) n°834/2007, n°889/2008 modifié par le règlement (CE) n°2018/1584 et le n°2018/848 qui abrogera le n°834/2007 au 01/01/2021 relatif à la production biologique) ne permet de rendre possible les épandages de boues dans la fertilisation des surfaces "bio". L'épandage des boues de STEP ne peut donc intervenir.

Toutefois, certains pays européens comme le Danemark sont en cours de réflexion pour intégrer des déchets valorisables comme les boues de station d'épuration en l'agriculture biologique.

Comme cité dans l'article 1.7.1. du règlement n°2018/848 du 30 mai 2018, les périodes de conversion pour le passage à l'agriculture biologique sont les suivantes : *“ Pour que des végétaux et produits végétaux soient considérés en tant que produits biologiques, les règles de production établies dans le présent règlement doivent avoir été mises en œuvre sur les parcelles concernées pendant une période de conversion de deux ans au moins avant l'ensemencement ou, dans le cas des pâturages et des fourrages pérennes, de deux ans au moins avant l'utilisation des produits comme aliments biologiques pour animaux ou, dans le cas des cultures pérennes autres que les fourrages, de trois ans au moins avant la première récolte de produits biologiques.”*

- Le dossier ne retient comme solution alternative à la valorisation agricole directe ou après compostage que la mise en ISDND. Quels sont les coûts comparés des différentes solutions d'élimination des boues : épandage, compostage solidification pour la construction, incinération ou enfouissement en ISDND ? Quelles pourraient être les autres solutions alternatives possibles à mettre en œuvre ? Comment se situe la France sur le plan de la politique européenne concernant les épandages de boues ?

Comme précisé dans le chapitre *4.8.4 Traitement par enfouissement en ISDND* du thème 8 : les filières alternatives, les boues ne constituent pas un déchet "ultime" puisqu'elles sont valorisables. Un débouché, autre que la mise en ISDND, est donc favorisé, conformément à la directive cadre Européenne sur les déchets du 19 novembre 2008 et l'arrêté du 21 juillet 2015 relatif au système d'assainissement qui précise la hiérarchie des modes de traitement à privilégier.

Les coûts moyens des filières de valorisation par ordre croissant sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 18: coût des filières de valorisation

Filière de traitement	Coût (€/TMB)
Valorisation agricole directe	30 à 45
Compostage	65 à 80
Méthanisation	65 à 80
ISDND	105 à 120
Incineration	120 à 135

La figure suivante, issue d'un rapport de 2007 , présente les filières de valorisation des boues de stations d'épuration mises en œuvre dans les principaux pays européens.

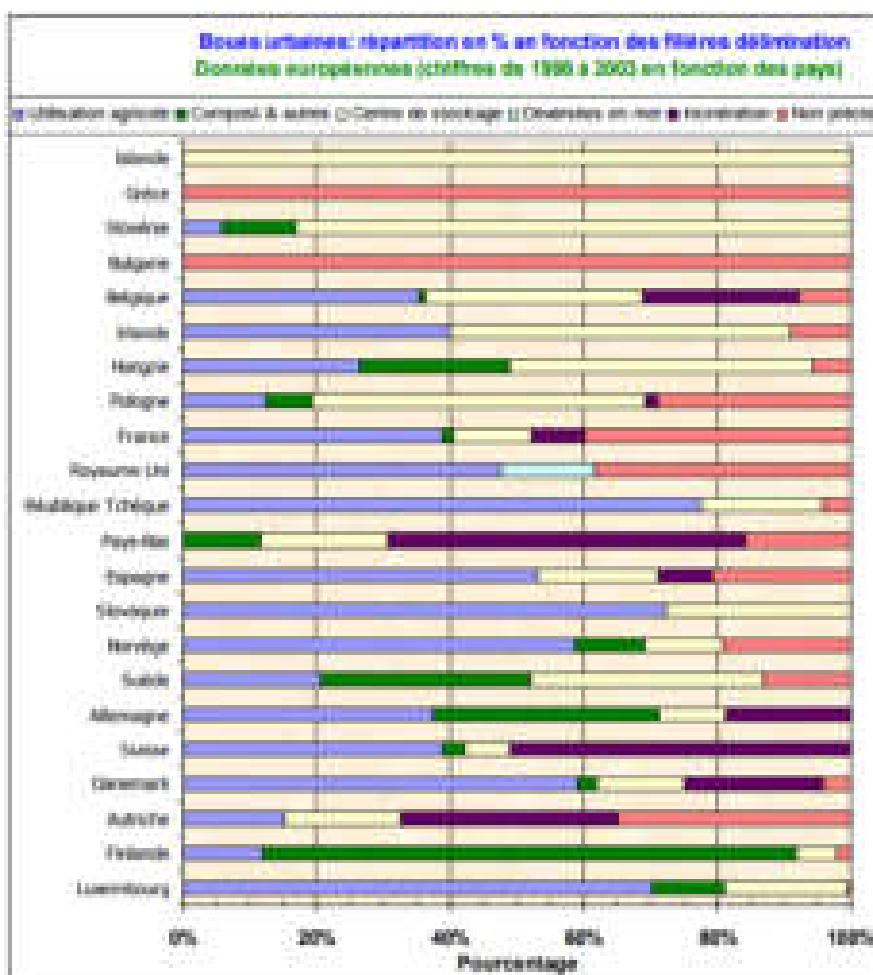


Figure 27: Filières de valorisation des boues d'épuration en Europe
 (source : Record)

Si ces données sont à prendre avec précaution (certaines données ne sont pas disponibles ou incomplètes et sont anciennes), elles montrent que la valorisation agricole (dont le compostage) est l'une des principales filières mises en œuvre pour les boues d'épuration au niveau européen. Ces données sont

confirmées par l'Observatoire Régional des Déchets en Ile-de-France (ORDIF), qui indique sur son site internet que 53 % des boues d'épuration à l'échelle européenne font l'objet d'une valorisation en agriculture.

A titre d'exemple, peuvent être citées :



Figure 28: Quelques exemples de valorisation agricole des boues en Europe

- Dans le classeur n°1, document 6, annexe 3 - étude de la phytotoxicité de la boue SAV, en pages 24, 25 et 26, sur l'activité mutagène vis-à-vis de SALMONELLA THYFIMURIUM, les trois tableaux donnent des résultats « positifs ». Quelle conclusion peut être tirée de cette qualification de résultat ?

En effet, les résultats de l'essai sur la mutagénèse sont considérés comme "positifs" sur les souches TA 98 et TA 100, et ce avec ou sans activateur métabolique (S9).

Cependant, comme évoqué dans la remarque p. 21, "le test d'Ames est initialement utilisé pour la caractérisation de substances pures, son interprétation sur des échantillons environnementaux étant rendue difficile par la complexité de leur composition. Certains éléments naturellement présents dans l'environnement comme des composés azotés peuvent réagir comme de faux positifs vis à vis du test d'Ames. En effet, il s'est avéré positif sur des échantillons de sol témoin (n'ayant subi aucune pollution) lors d'études financées par l'Ademe (Contrat Ademe-Vadetox n°0375C0010 : « Evaluation écotoxicologique des déchets et produits dérivés en vue de leur valorisation agricole : vers une démarche intégrée d'évaluation prospective des risques pour les écosystèmes »). Ces remarques ont été transmises au LCA La Rochelle avant réalisation de l'essai. "

Les incertitudes quand à l'interprétation des résultats du test d'Ames sur des matrices organiques complexes telles que les boues de Seine aval -contenant notamment 7,4% d'azote-, sont toujours d'actualité au sein de la communauté scientifique [Source : *Recommended criteria for the evaluation of bacterial mutagenicity data (Ames test)* - Dan D. LEVY - 07/2019], et ne permettent pas d'établir une conclusion définitive à date, du fait des risques de faux positifs.

Cette interprétation nous a également été confirmée par les experts de notre laboratoire d'analyse agréé : *"Si les résultats avaient été négatifs, il aurait été possible de conclure. Mais dans le cas de résultats positifs, on ne peut pas conclure qu'il y a un risque mutagène."*

Enfin, si ce test est reconnu depuis plusieurs années comme une référence pour l'analyse des substances cancérogènes, il se base sur l'évolution d'une population de bactéries "Salmonella typhirium", qui ne présentent pas les mêmes caractéristiques que l'organisme humain.

D'ici 2020/2021, l'ensemble des tests de phytotoxicité sur les boues de Seine aval seront refaits.

- Comment est réalisé le contrôle des micropolluants dans les eaux usées industrielles, avant leur traitement en STEP ?

Comme expliqué dans le chapitre 4.3.1.1. *Origine des boues de Seine aval* du thème 3 : la composition des boues et leur toxicité, 10% des eaux usées entrantes sur l'usine Seine aval sont d'origine industrielles.

Le SIAAP définit pour chaque industriel des critères à respecter pour le rejet des effluents industriels dans le réseau. Ces critères prennent en compte la charge rejetée par chaque établissement, notamment en ETM, PCB, et autres micropolluants : ils permettent de maîtriser la composition des boues en sortie de traitement, et leur conformité à l'arrêté du 8 janvier 1998.

Le SIAAP, conjointement aux services départementaux, a mis en place une procédure d'édification des arrêtés d'autorisation de déversements, suivis, lorsque cela est nécessaire, d'une convention de déversement.

Au total, le nombre d'arrêtés d'autorisation de déversement délivrés et recensés sur la zone SIAAP au 31 décembre 2018 est de 1 492 , répartis sur les 8 départements du 75, 77, 78, 91, 92, 93, 94, 95. Ces arrêtés d'autorisation concernent les industries mais également tout type d'entreprise qui rejette des eaux non domestiques.

- Le document d'étude préalable précise (page 105) que le plan prévisionnel d'épandage est transmis un mois minimum avant le début des opérations à l'administration et aux maires des communes concernées. Existe-t-il une information des maires sur les plans d'épandages sur leur commune ? Quelle peut être l'information dont dispose le public ?

Le Plan Prévisionnel d'Épandage (PPE) n'est aujourd'hui pas communiqué aux communes mais uniquement aux services de la police de l'eau. Ce document peut-être transmis à toute personne en faisant la demande.

Le public peut consulter sur le site <http://bouesseineaval.siaap.fr/>, les résultats d'analyses des boues, les données sur les périmètres d'épandage (arrêtés d'autorisation, communes concernées, surfaces...).



Une pancarte est également déposée sur les tas livrés en tête de parcelles agricoles, de manière à informer les riverains de la nature du produit. Cette pancarte précise l'origine des boues et les coordonnées de l'usine. Chaque demande (écrite ou téléphonique) fait l'objet d'une réponse de la part du SIAAP.

Une invitation aux réunions de secteur est également envoyée chaque année aux communes concernées par les épandages afin de leur présenter le bilan des épandages de la campagne (tonnage épandu, secteur concerné, déroulement des épandages, suivi des réclamations, etc). Le SIAAP propose, dans le cadre de la nouvelle procédure d'autorisation, de transmettre aux communes concernées par les épandages, un extrait communal du PPE avant le début des épandages.

Le dossier décrit le processus de contrôle de la filière d'épandage par le biais de l'exploitation d'un logiciel informatique et une localisation géographique des parcelles concernées par GPS. Un suivi sur le terrain est-il exercé et pouvez-vous, le cas échéant, préciser le nombre de techniciens affectés à cette tâche pour l'Eure-et-Loir ?

Le contrôle des livraisons

Comme précisé dans le chapitre 4.4.3.4 *Evacuation et livraison des boues de Seine aval* du thème 4 Le recul d'expérience et le principe de précaution, les livraisons sont suivies en temps réel par géolocalisation. Ce système permet de suivre, en temps réel, l'itinéraire du camion et de s'assurer de la conformité du lieu de dépotage.

Depuis 2011, le SIAAP impose à son prestataire de contrôler 100% des livraisons. Ces contrôles nécessitent une organisation technique et humaine adaptée (Cf. Figure 29).



Figure 29: Schéma d'organisation du contrôle des livraisons

Ainsi, plusieurs personnes interviennent dans le cadre du contrôle des livraisons :

- les chauffeurs (appel sur le terrain, prise de photo, pancartage)
- le pôle logistique constitué de 2 personnes (réception appel, suivi des camions, validation localisation, enregistrement des photos)
- le technicien en charge du suivi des épandages sur le département (contrôle visuel terrain en fin de livraison, saisies des contrôles, incidents)

Le contrôle des épandages

Les épandages de boues de Seine aval sont réalisés par des Entreprises de Travaux Agricoles (ETA) locales, expertes pour ce type de prestation, et retenues selon un cahier des charges répondant aux exigences du SIAAP.

Avant la campagne d'épandage, chaque entreprise de travaux agricoles est destinataire d'un cahier d'épandage qui reprend les informations nécessaires au bon déroulement des opérations d'épandage :

- la liste et la localisation de l'ensemble des parcelles que l'ETA doit épandre,
- la localisation des zones d'exclusion,
- les accès aux parcelles,
- les consignes à respecter pour la campagne : étalonnage des épandeurs, bonnes pratiques, ...
- les différents opérateurs de la filière,
- la liste des adresses et des coordonnées téléphoniques des agriculteurs.

Ce document est complété par l'ETA, au fur et à mesure des épandages, puis remis au conseiller technique chargé du secteur en fin de campagne. Ces données servent à l'établissement du registre d'épandage.

De plus, afin de s'assurer de l'absence d'épandage en zones inaptes, le prestataire du SIAAP a mis en place une méthodologie basée sur la classification des parcelles en fonction de leur niveau de sensibilité. Cette méthodologie permet de faciliter la localisation des zones inaptes sur le terrain, par un balisage des zones ou la présence d'un technicien lors de l'épandage.

Le tableau suivant présente les dispositions prises pour permettre l'identification des zones inaptes sur le terrain, en fonction du niveau de sensibilité de la parcelle.

Tableau 19: Schéma d'organisation du contrôle des épandages

Type de parcelle	Type de zone inapte	Dispositions vis-à-vis des zones inaptes
Parcelle « très sensible »	<ul style="list-style-type: none"> · Zones inaptes multiples et complexes 	<ul style="list-style-type: none"> · Localisation des zones inaptes sur la carte fournie à l'ETA · Balisage des zones inaptes · Présence du technicien le jour de l'épandage
Parcelle « sensible »	<ul style="list-style-type: none"> · Pente et présence d'un cours d'eau / captage d'eau · Zone inapte (non délimitée naturellement ou multiple) 	<ul style="list-style-type: none"> · Localisation des zones inaptes sur la carte fournie à l'ETA · Balisage des zones inaptes
Parcelle « peu sensible »	<ul style="list-style-type: none"> · Zone inapte simple et délimitée naturellement (présence d'une bande enherbée, jachère, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> · Localisation des zones inaptes sur la carte fournie à l'ETA

De plus, le prestataire du SIAAP déploie progressivement un système de suivi des épandages par GPS, permettant au conducteur de l'épandeur de visualiser directement sa localisation par rapport aux zones inaptes, sur un écran disposé dans sa cabine. En Eure-et-Loir, 100% des parcelles épandues sont suivies par GPS.

100% des parcelles épandues sont contrôlées par le prestataire du SIAAP.

Les moyens de contrôle sont adaptés en fonction du niveau de sensibilité de la parcelle :

- Méthode préventive : balisage des zones inaptes pour les parcelles sensibles et très sensibles, présence du technicien le jour de l'épandage pour les parcelles très sensibles.

- Contrôle a posteriori : passage d'un technicien sur le terrain dans un délai de 1 à 2 semaines pour les parcelles présentant une zone inapte (dans un délai de 4 semaines pour les parcelles ne présentant aucune zone en aptitude 0).

Ainsi, plusieurs personnes interviennent dans le cadre du contrôle des épandages :

- les ETA (réalisation des épandages, transmission des données, suivi du cahier d'épandage)
- le technicien en charge du suivi des épandages sur le département (contrôle visuel terrain en fonction de la sensibilité des parcelles, saisies des contrôles, incidents)

- Dans le cas d'épandage de boues prévu à moins de 100 mètres des habitations, comment le SIAAP peut-il garantir que les boues ne seront pas stockées plus de 48h ? Compte tenu des incertitudes climatiques actuelles, dans le cas d'un stockage des boues en bout de parcelle sur une longue période, quelle serait la conséquence d'une météo défavorable due à une durée importante de fortes pluies continues ? Quelles seraient les dispositions envisagées pour assurer un entreposage sécurisé compte tenu des capacités actuelles de la station d'épuration ?

Les boues peuvent être stockées toute l'année en tête de parcelle ou sur des dépôts, car elles respectent les différents critères réglementaires.

En effet, conformément à l'arrêté du 8 janvier 1998, le dépôt temporaire de boues, en tête de parcelle, et sans travaux d'aménagement, n'est autorisé que lorsque les 4 conditions suivantes sont simultanément remplies :

- les boues sont solides (angle de talutage de 30° minimum) et ont fait l'objet d'un traitement de stabilisation, ce qui est le cas des boues de Seine aval,
- toutes les précautions ont été prises pour éviter le ruissellement sur ou en dehors des parcelles d'épandage ou une percolation rapide vers les nappes superficielles ou souterraines,
- le dépôt respecte les distances minimales d'isolement (Cf. Figure 30),
- seules sont entreposées les quantités de boues nécessaires à la période d'épandage considérée. Cette quatrième condition n'est pas applicable aux boues hygiénisées, et par conséquent aux boues de Seine aval.

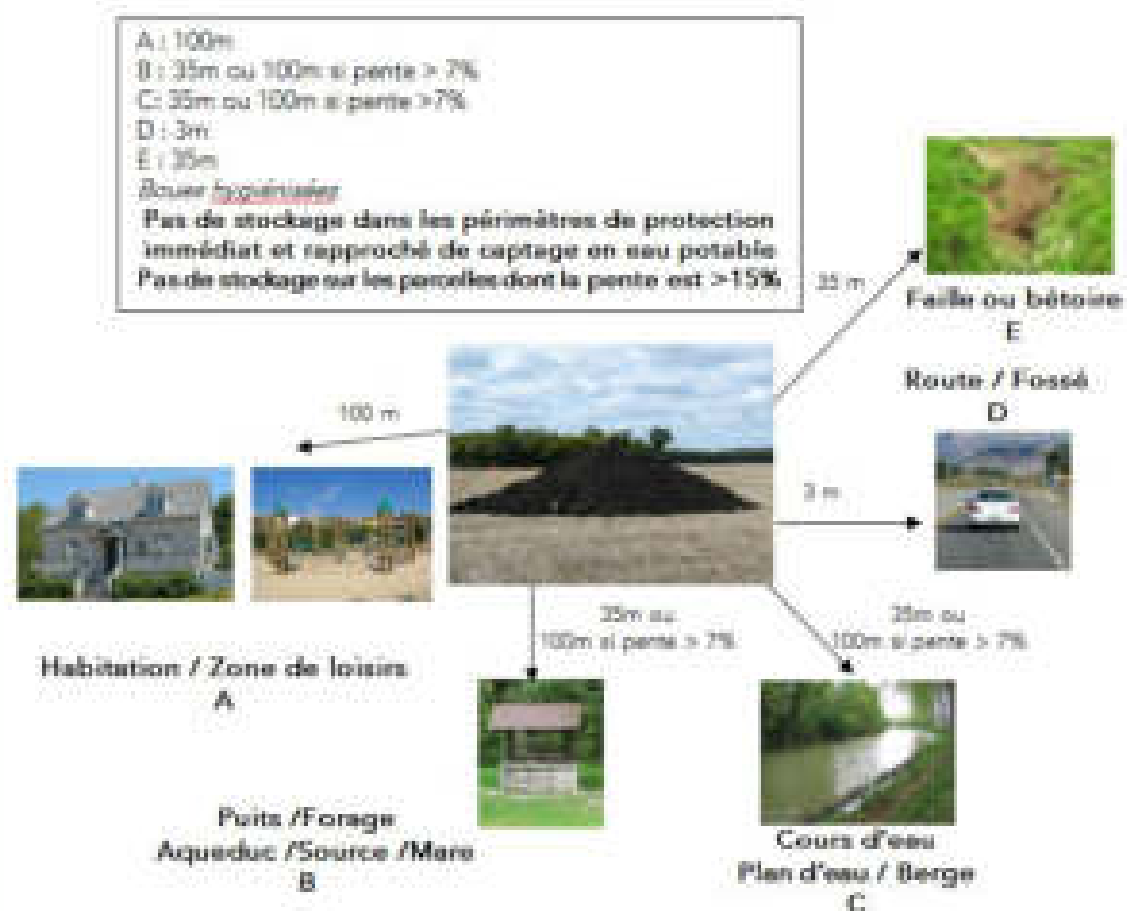


Figure 30: Distance d'isolement pour l'entreposage des boues de Seine aval

Le SIAAP va au delà de la réglementation en :

- ne réalisant pas de stockage à proximité des monuments historiques,
- ne stockant pas de boues à moins de 35 m des failles ou bétaires,
- prenant en compte les vents dominants dans le choix de la localisation du site d'entreposage.

Les lieux de livraison sont retenus pour leur aptitude au stockage et sont définis, au moment des commandes, en concertation avec l'agriculteur, de manière à limiter la distance entre le dépôt et le lieu d'épandage, tout en tenant compte de la proximité des habitations, des lieux touristiques...

Les stockages sont réalisés sur des parcelles du périmètre aptes à l'épandage, ou des plateformes, et en dehors des périmètres de captage immédiats ou rapprochés.

Comme présenté dans le chapitre 4.10.6.2 *Accumulations dues au stockage*, le SIAAP a réalisé plusieurs essais afin de comprendre le comportement des entreposages en tête de parcelles et les conséquences éventuelles sur le sols et la ressource en eaux notamment en cas d'évènement pluvieux. Ces essais ont conclu à l'absence d'impact.

Le SIAAP dispose actuellement d'une capacité de stockage d'environ 4 mois. La réglementation en vigueur autorise le dépôt des boues de Seine aval toute l'année en tête de parcelle.

La capacité d'entreposage de la station d'épuration et la possibilité de stocker en tête de parcelle toute l'année permet au SIAAP de disposer d'une filière d'épandage sécurisée.

- La concentration des coliformes thermo-tolérants non pathogènes mais indicateurs d'une contamination est analysée et sert de référence sans qu'il y ait de valeurs limites. Y a-t-il le même processus d'analyse pour les résidus médicamenteux? Quelles sont les mesures réalisées dans ce domaine ?

Les réponses à ces questions sont développées dans les chapitres 4.3.1.2.2 *Hormones et résidus médicamenteux* et 4.3.2. *Les analyses RSDE dans les eaux et dans les boues* du thème 3 : "La composition des boues et leur toxicité."

- L'observation de Mr Bourg mentionne que les boues sont susceptibles d'apporter du cadmium en quantité non négligeable et potentiellement très mobile dans des conditions normales de pluie; qu'en serait-il en période de pluie intense ? Le dossier précise que les fertilisants chimiques apportent une quantité bien supérieure de cet élément. Est-il possible de justifier cette affirmation du dossier ?

Une étude précise contrairement à ce qui est affirmé dans le dossier que les substances émergentes se retrouvent dans les boues de station d'épuration. Compte-tenu des progrès dans le domaine quelles sont les mesures envisageables pour le traitement des produits pharmaceutiques, pesticides.... ?

L'observation de Mr Bourg repose sur des études réalisées dans les années 1980. Comme présenté dans le chapitre 4.3.1.2.1 *Les éléments-traces* du thème 3 "La composition des boues et leur toxicité", les teneurs en éléments-traces des boues de Seine aval ont considérablement diminuées depuis 20 ans, et notamment celles du cadmium qui a été divisée par 10.

Le chapitre 4.3.9. *Protection des eaux de surface et souterraines*, précise toutes les dispositions imposées par la réglementation (distances d'isolement, enfouissement, calendrier d'épandage...) pour limiter l'impact des épandages sur la ressources en eau notamment lié au ruissellement en cas d'épisode de pluie. L'INERIS a publié un rapport intitulé "cadmium et principaux composés" (INERIS, 2015. Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : DRC-16-158744-09774A, p. 58 (<http://rsde.ineris.fr/> ou <http://www.ineris.fr/substances/fr/>). Ce rapport présente un comparatif des sources d'apport en cadmium sur les sols agricoles :

Tableau 20: Part de différentes sources de contamination dans l'estimation des apports de cadmium sur les sols agricoles (Source : Ademe-Sogreah 2007 dans Bottin et al. 2014a)

Source de contamination	%
Traitements phytosanitaires	0
Déjections animales	25
Boues et composts	5
Engrais minéraux	54
Amendements calciques et magnésiens	2
Retombées atmosphériques	14

L'étude de Record (rapport de juin 2012) qui précise que les substances émergentes se retrouvent dans les boues de STEP a été réalisée uniquement à partir de références bibliographiques anciennes. Les conclusions de cette étude ne peuvent en aucun cas se substituer à celles du vaste programme de recherches de l'INERIS en collaboration avec le CNRS et en partenariat avec l'ADEME, le SYPREA, la FP2E et le SIAAP sur les "substances émergentes dans les boues et les composts de boues de stations d'épuration d'eaux usées collectives - caractérisation et évaluation des risques" entamée en 2011, dont une caractérisation de 114 substances et un rapport final en novembre 2014 (Etude présentée dans le chapitre 4.3.1.2.3 *Substances émergentes*). En effet, cette étude est basée sur l'analyse d'échantillons représentatifs de boues avec des méthodes d'analyses récentes adaptées à la recherche de certaines molécules.

- Comment sont pris en considération les gouffres, les bétoires et les marnières nombreuses dans les secteurs de Boullay-Mivoye, de Boullay-les-deux-Eglises et de Vert-en-Drouais, qui pourraient recevoir des résidus des boues épandues par infiltration ?

La réponse à cette question est présentée dans le chapitre 4.10.3 *La prise en compte des marnières et bétoires* du thème 10 : "L'aptitude de certains sols."

- Comment est réalisé le choix des parcelles pour effectuer le contrôle des coliformes thermo-tolérants sur la période de mi-juillet à mi-octobre, contrôle par analyse effectuée tous les quinze jours, soit six analyses pour chaque parcelle choisie, alors qu'il est annoncé quinze analyses par an sur des boues entreposées en tête de parcelle durant la période d'épandage de mi-juillet à mi-octobre (page 26 de l'étude préalable).

D'après l'article 16 de l'arrêté du 8 janvier 1998, "...les traitements d'hygiénisation font ensuite l'objet d'une surveillance des coliformes thermotolérants dans les conditions prévues à l'article 14, paragraphe 1, deuxième alinéa, à une fréquence d'au moins une analyse tous les quinze jours durant la période d'épandage. Les concentrations mesurées seront interprétées en référence à celle obtenue lors de la caractérisation du traitement et doivent démontrer un bon fonctionnement de l'installation de traitement et l'absence de recontamination."

Le SIAAP réalise 1 analyse tous les 15 jours toute l'année en sortie de filtre-pressé sur les coliformes thermotolérants soit 26 analyses par an comme présenté en page 26 de l'Étude préalable.

Les analyses sur les entreposages en tête de parcelle s'intègrent dans une démarche volontaire du SIAAP car il n'y a aucune obligation réglementaire. En moyenne 1 à 2 analyses par département sont réalisées sur ces entreposages.

Le SIAAP va donc au delà de la réglementation avec une fréquence d'analyses supérieure à ce qui est imposée par la réglementation ainsi qu'en réalisant des analyses sur les entreposages en tête de parcelle.

- Le dossier cite le PDEDMA (Plan Départemental d'Élimination des Déchets Ménagers et Assimilés). Or celui-ci devait être remplacé par le Plan de Prévention et de Gestion des Déchets Non Dangereux, ce remplacement est-il effectif et pris en compte dans le cadre de l'activité de valorisation des boues de la station d'Achères ?

Le PDEDMA d'Eure-et-Loir approuvé le 22 avril 2011 est toujours en vigueur et n'a pas encore été remplacé par le Plan de Prévention et de Gestion des Déchets Non Dangereux (PPGDND).

- Dans la note complémentaire à la demande d'autorisation, page 3, dans la liste des modifications du parcellaire liées au remembrement de 3 communes, certaines parcelles sont concernées par une analyse de sortie du programme d'épandage suite à désistement alors que d'autres sont marquées « pas d'analyse de sortie car la parcelle ne contient aucun point de référence ». Cette dernière remarque semble contradictoire avec ce qui est affirmé par ailleurs dans le dossier, à savoir que toute parcelle subit une analyse de sol en sortie du programme d'épandage. À l'analyse d'un certain nombre de cartes beaucoup de points de référence y apparaissent, à proximité les uns des autres sur des types de sol identiques, alors que l'explication du texte, conformément à la réglementation prévoit un point de référence par zone homogène de 20 ha maximum. Pourquoi, alors, autant de points de référence, qui semblent superflus, alors que d'autres parcelles ne sont pas soumises à analyse en sortie parce qu'elles n'en ont pas ?

L'analyse décennale des sols concerne-t-elle seulement les points de référence ou chaque parcelle ? Après l'ultime épandage et dans le cas de retrait de parcelle du périmètre cette analyse concerne-t-elle la parcelle ou le point de référence de la zone homogène ?

Les bulletins d'analyse des points en sortie de programme semblent moins complets que les bulletins d'analyse des points de référence. Pour le suivi sur le long terme de l'innocuité des épandages les analyses de sortie ne devraient-elles pas être identiques à celles des points de référence ?

D'après l'article 15 de l'arrêté du 8 janvier 1998, "Les sols doivent être analysés sur chaque point de référence tel que défini à l'article 2, alinéa d : après l'ultime épandage sur la parcelle de référence en cas d'exclusion de celle-ci du périmètre d'épandage...". Dans le cas d'une parcelle sortant du plan d'épandage, seules celles qui contiennent un point de référence doivent donc être analysées après le dernier épandage.

Comme présenté en page 74 de l'Étude préalable, 8 zones homogènes ont été définies suite à l'étude pédologique du périmètre d'épandage regroupant chacune plusieurs unités de sol.

La notion de 1 analyse pour 20 ha qui peut porter à interprétation, amène dans certains cas à réaliser plusieurs points de référence sur une même parcelle notamment sur les parcelles de plus de 20 ha. Par exemple une parcelle de 25 ha devra comporter 2 points de référence si l'on veut respecter strictement et mathématiquement la règle (absence de raisonnement agropédologique). Dans ce cas, une plus petite parcelle de la même zone homogène est rattachée à un des 2 points de référence de la grande parcelle. C'est pourquoi sur certaines exploitations, certains points de référence sont proches car réalisés sur une même parcelle de grande taille.

Comme décrit dans l'article 2 de l'arrêté du 8 janvier 1998, chaque point de référence est représentatif d'une zone homogène. L'analyse décennale est réalisée sur chaque point de référence (qui a une analyse initiale de référence associée) et non sur chaque parcelle. Si une parcelle sort du plan d'épandage ce sont bien les parcelles qui contiennent un point de référence ayant fait l'objet d'un suivi avant épandage qui sont analysées.

Les analyses d'entrée dans le périmètre d'épandage comportent l'analyse de la valeur agronomique des sols (pH, P₂O₅, CaO...) qui n'est pas analysée sur les points de sortie. En effet, les analyses de sortie, comme les analyses décennales permettent de vérifier que les sols sont toujours aptes à l'épandage et que les teneurs en ETM sont inférieures aux seuils réglementaires. L'analyse de la valeur agronomique n'est donc pas réalisée car elle sert uniquement à raisonner la fertilisation.

L'analyse de la valeur agronomique est réalisée sur les points de référence concernés par un épandage.

- Dans le document d'étude préalable, page 52, il est écrit : « stockage des boues uniquement à partir du 10 avril pour les parcelles situées dans les aires d'alimentation de captage prioritaires Grenelle et Conférence environnementale ». Page 54 du même document il est écrit : « interdiction d'épandage sur les parcelles situées en périmètre de protection immédiat et rapproché de captage ». Les deux affirmations ne seraient-elles pas contradictoires ?

Comme différenciées dans les chapitre 4.3.9.2 *Les Captages d'Alimentation en eau Potable (AEP)* et 4.3.9.3 *Les aires d'Alimentation de Captages*, il s'agit de 2 protections différentes dans lesquelles les prescriptions ne sont pas les mêmes.

Les épandages et les stockages de boues de Seine aval sont interdits en périmètre de protection immédiat et rapproché de captage d'eau potable.

Le SIAAP s'impose dans les Aires d'Alimentation de Captage Grenelle et Conférence Environnementale des livraisons uniquement à partir du 10 avril.

- En page 95 du même document le tableau en haut de la page 95 montre les périodes d'épandage (et les périodes interdites, en rouge semble t-il (pas de légende)). Le tableau montre ainsi la possibilité d'épandage sur prairie alors que le texte précise, par ailleurs, que les boues ne sont jamais épandues sur prairie. Comment expliquer cette différence ?

L'arrêté du 8 janvier 1998 autorise les épandages sur prairie sous certaines conditions comme présenté dans l'annexe II :

	DÉLAI MINIMUM	
Épandage de cultures fourragères	Six semaines avant la remise à l'herbe des animaux ou de la récolte des cultures fourragères	Cas général, sauf bords hydrauliques.
	Trois semaines avant la remise à l'herbe des animaux ou de la récolte des cultures fourragères	Bords hydrauliques.

Figure 31: Extrait du tableau 4 arrêté du 08/01/98 - Distances d'isolement et délais de réalisation des épandages

Toutefois, le SIAAP a fait le choix de ne pas épandre sur ce type de culture.

RÉFÉRENCES

Textes réglementaires relatifs aux épandages de boues, à la fertilisation et à la protection des ressources en eau :

Arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO₅.

Arrêté du 28 mai 2014 relatif au programme d'action régional à mettre en œuvre en vue de la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole dans la région Centre-Val de Loir

Arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole (entré en application le 01/09/2012 et modifié par arrêté du 23/10/2013 et du 11/10/2016).

Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement dite « Grenelle 2 ».

Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement dite « loi Grenelle 1 ».

Décret n° 2009-550 du 18 mai 2009 relatif à l'indemnisation des risques liés à l'épandage agricole des boues d'épuration urbaines ou industrielles.

PDEDMA de avril 2011 approuvé par le Conseil départemental d'Eure-et-Loir.

Circulaire DE/SDPGE/BLP n°9 du 18 avril 2005 relative à l'épandage agricole des boues de stations d'épuration urbaines du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable.

Loi constitutionnelle du 1^{er} mars 2005 relative à la Charte de l'Environnement.

Arrêté du 30 avril 2002, relatif au référentiel de l'agriculture raisonnée désigne l'épandage de boues comme une pratique de fertilisation des cultures (Ministère de l'agriculture et de la pêche).

Décret n°2002-631 du 25 avril 2002 relatif à la qualification des exploitations agricoles au titre de l'agriculture raisonnée.

Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n°97-1133 (Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement).

Décret n°97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées (Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement). Ce décret est abrogé et codifié en intégralité dans le **livre II du code de l'environnement** (art. R211-25 à R211-47).

Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau complétée par la **loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006** sur l'eau et les milieux aquatiques.

Directive "nitrates" (91/676/CEE) du 12 décembre 1991 concerne la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole. Cette directive a été traduite en droit français par le **décret n° 93-1038 du 27 août 1993**.

Directive du Conseil n° 86-278 du 12 juin 1986 relative à la protection de l'environnement, et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture.

Décret n° 2017-626 du 25 avril 2017 relatif aux procédures destinées à assurer l'information et la participation du public à l'élaboration de certaines décisions susceptibles d'avoir une incidence sur l'environnement et modifiant diverses dispositions relatives à l'évaluation environnementale de certains projets, plans.

Ordonnance n° 2016-1060 du 3 août 2016 portant réforme des procédures destinées à assurer l'information et la participation du public à l'élaboration de certaines décisions susceptibles d'avoir une incidence sur l'environnement.

La loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques.

La loi de finance n° 2016-1917 du 29 décembre 2016, modifiant ou créant plusieurs mesures fiscales.

Etudes et programmes de recherche :

INRA, VERI, 2014. **Apport de Produits Résiduaire Organiques – Quels effets sur les services écosystémiques rendus par les sols ?**

INERIS, CNRS, 2014. **Substances “émergentes” dans les boues et composts de boues de stations d'épurations d'eaux usées collectives – Caractérisation et évaluation des risques sanitaires.**

INRA, 2014. **Valorisation des matières d'origine résiduaire sur sols à usage agricole ou forestier (Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques).**

Soulier C., Gabet, V., LeMenach K., Pardon P., Esperanza M., Miège C., Choubert J.M., Martin-Ruel S., Bruchet A., Coquery M., Budzinski H, 2011. **Zoom sur les substances pharmaceutiques : présence, partition, devenir en station d'épuration.** *Techniques Sciences et Méthodes*, 1/2: 63-77. 2011.

Budzinski H., Soulier C., Esperanza M., Miège C., Coquery M., Choubert J.M., Martin-Ruel S., Bruchet A, 2009. **Concentrations et flux de micropolluants dans les eaux usées et les boues de stations d'épuration.** *Minutes de la Journée de restitution technique du projet de recherche AMPERES.* 26 novembre 2009.

ADEME, SYPREA, SPDE, INERIS, 2005-2007. **Evaluation des risques sanitaires des filières d'épandage des boues de station d'épuration - Application de la méthodologie relative aux substances chimiques à une filière de boues issues d'une STEP urbaine.**

CHAUSSOD R., 2000. **Boues de stations d'épuration et métaux lourds.** INRA.

BRGM, **Inventaire départemental des cavités souterraines d'Eure-et-Loir**, Rapport final, août 2005.

Document et études SIAAP :

SIAAP, site **Boues Seine aval** : <http://bouesseineaval.siaap.fr/>

SIAAP, 2018. **Bilan agronomique campagne 2017.**

SIAAP/SEDE. (2016). **Suivi d'un dépôt de boues de Seine aval**

SIAAP, 2005. *Règlement d'Assainissement.* Disponible en ligne sur le www.siaap.fr/

SIAAP/SEDE. (2000). **Analyse du comportement d'un entreposage de boues au champ – station d'épuration Seine aval du SIAAP**

SIAAP/SEDE (Avril 2019) projet STEPHOR

Dossiers, publications, autres supports :

MEDDE, MAAF, 2015. **Les épandages sur terres agricoles de matières fertilisantes d'origine résiduaire – mission prospective sur les modalités d'encadrement et de suivi réglementaire.**

Plan National Santé Environnement (PNSE) 1 (2004-2008), PNSE 2 (2009 – 2013) et PNSE 3 (2015-2019).

MEDDE, MAAF, juin 2013. **Guide méthodologique – Protection d'aire d'alimentation de captage en eau potable contre les pollutions liées à l'utilisation de fertilisants et de pesticides**

ANSES, 2012. **Avis de l'ANSES – Saisine relative aux polymères de synthèse intégrés dans les produits destinés à finir leur vie dans les sols agricoles.**

GisSol – novembre 2011 1^{er} bilan de « L'état des sols en France ». <http://www.gissol.fr/index.php>

MEDAD, MAAF, 2009. **Bilan de 10 années d'application de la réglementation relative à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées.**

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par SOGREAH - Rapport final Mai 2007 - **Bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France métropolitaine - Bilan qualitatif de la contamination par les éléments tracés métalliques et les composés tracés organiques et application quantitative pour les éléments tracés métalliques.**

SYPREA, 2006. **Recycler les boues en agriculture, un choix raisonné.** DVD.

La nouvelle **Politique Agricole Commune (PAC)** - Conditionnalité 2005 Livret I et II.

Commission Européenne/DG Environnement, 30 avril 2003. « **Proposal for a directive of the European parliament of the council on spreading of sludge on land, Draft 4** ». Document de réflexion sur la révision de la Directive "boues" de 1986.

ADEME, 2001. **Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture.** Réalisé par le Comité Technique Permanent sur l'épandage des boues d'épuration (CTP). ADEME Editions (n°3802) - site de l'ADEME : www.ademe.fr rubrique « Espace partenaire ».

Sites internet consultés :

Site internet de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). www.ademe.fr

Site internet du centre antipoison environnemental de l'Ouest.

www.centre-antipoison-environnemental.com/boues-station-epuration.html

Site internet du Club Retour à la Terre. <http://www.retouralaterre.org/>

Site internet de l'institut de l'économie circulaire. <http://www.institut-economie-circulaire.fr/>

Site internet du Syndicat des Professionnels du Recyclage en Agriculture (SYPREA) www.syprea.org

Site internet "mieux connaître les risques sur le territoire" <http://www.georisques.gouv.fr/>

Site internet <https://www.geoportail.gouv.fr/>

ANNEXES

Annexe 1 : Plaquette de communication

Annexe 2 : Rapport du contrôle de l'affichage en mairie

Annexe 3 : Rapport Publilegal de l'implantation des affiches sur les parcelles agricoles

Annexe 4 : Courriers de dépôt du dossier (SIAAP/DDT)

Annexe 5 : Publications scientifiques de résultats sur l'essai phosphore

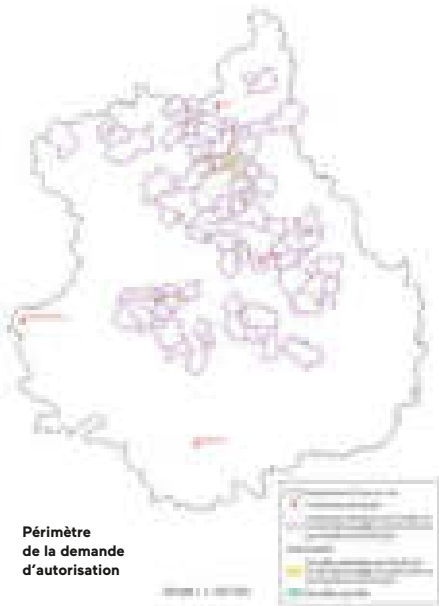
ANNEXE 1 :

Plaquette de communication

L'ÉPANDAGE DES BOUES DANS LE DÉPARTEMENT DE L'EURE-ET-LOIR

Le département de l'Eure-et-Loir est autorisé à valoriser les boues thermiques de Seine aval par les arrêtés préfectoraux du 11 juin 2004, modifiés le 14 janvier 2014, et du 28 mai 2010. Ces arrêtés arrivant respectivement à échéance le 11 juin 2019 et le 28 mai 2019, un dossier a été déposé aux services de la DDT le 23 mai 2017 pour renouveler ces autorisations et intégrer de nouvelles surfaces dans le cadre d'une mise à jour au seuil de modification (conformément à la circulaire du 18/04/2005 et à la doctrine de la DDT sur son interprétation).

L'instruction de la demande d'examen au cas par cas, par la Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DREAL), de la Région Centre-Val-de-Loire, a statué le 25 juillet 2017 sur la nécessité de réaliser une étude d'impact. Suite à cet avis et au courrier de la DDT, en date du 13 novembre 2017, le dossier a fait l'objet d'une demande d'autorisation environnementale unique avec évaluation environnementale, déposée le 6 juin 2018.



Un arrêté de prorogation des autorisations permettra au SIAAP de valoriser ces boues dans le département de l'Eure-et-Loir en 2019. L'évolution des pratiques raisonnées de fertilisation, suite à la réévaluation à la hausse de la disponibilité pour les cultures du phosphore présent dans les boues, a conduit à une diminution régulière de la dose d'apport des boues au cours des 10 dernières années.

Le périmètre d'épandage des boues de Seine aval en Eure-et-Loir a perdu environ 1900 ha depuis 2014 suite à des désistements d'exploitation agricoles pour cause de changement de pratique culturale, de cession d'exploitation, d'intégration sur un autre plan d'épandage...

De ce fait, le SIAAP présente dans le cadre d'une nouvelle procédure d'autorisation environnementale, dans le département de l'Eure-et-Loir, le renouvellement des parcelles de son périmètre d'épandage (parcelles déjà autorisées par les arrêtés du 11/06/2004, du 14/01/2014 et du 28/05/2010) et l'ajout de nouvelles parcelles. Cette procédure permettra de compenser la perte de potentiel d'épandage engendrée par l'évolution des pratiques et du périmètre d'épandage (désistement d'exploitations).

	Périmètre autorisé au 02/05/2019 par les arrêtés du 11/06/2004, du 14/01/2014 et du 28/05/2010	Mise à jour dans le cadre de la circulaire	Périmètre global
Surface totale	5 933,5	760,52	6 694,02
Surface épandable	5 685,83	753,34	6 439,17
Nombre de communes			75
Nombre d'exploitation			54

UNE AMÉLIORATION CONSTANTE DE LA FILIÈRE

Le SIAAP participe à l'amélioration de la connaissance sur les boues qu'il produit au travers de programmes de recherche nationaux ou européens. Il effectue également des analyses complémentaires sur la disponibilité des éléments fertilisants contenus dans les boues, et des essais pour évaluer l'impact de leur épandage. Les résultats de ces études permettent une évolution constante de la filière, en optimisant l'intérêt agronomique des boues, dans le respect de la santé et de l'environnement.

Pour en savoir plus : <http://bouesseineaval.siaap.fr>

Contact :
SIAAP - Site Seine aval
Route centrale des Noyers BP 104
78603 Maisons-Laffitte Cedex
Tél. : 01 30 86 30 86



avec l'assistance de son prestataire de service SEDE Environnement
Tél. 01 34 93 25 55

Seine aval

USINE D'ÉPURATION



VALORISATION DES BOUES DE SEINE AVAL DANS L'EURE-ET-LOIR



QUE SONT LE SIAAP ET L'USINE SEINE AVAL ?

> **LE SIAAP** : Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne

Son statut : Établissement public administratif de coopération interdépartementale. Créé le 31 août 1970 suite à la réorganisation de la région parisienne, il est à la fois une collectivité territoriale et une entreprise industrielle publique.

Sa zone d'action : les 4 départements constitutifs (Paris, les Hauts-de-Seine, la Seine-Saint-Denis et le Val-de-Marne) et 180 communes du Val-d'Oise, de l'Essonne, des Yvelines et de Seine-et-Marne.

Ses missions : le SIAAP est le service public qui dépollue chaque jour les eaux usées de près de 9 millions de franciliens, ainsi que les eaux pluviales et les eaux industrielles, pour rendre à la Seine et à la Marne une eau propice au développement du milieu naturel. Avec ses 1928 agents, le SIAAP traite quotidiennement près de 2,5 millions de m³ d'eau, transportés par 440 km d'émissaires et traités par ses 6 usines d'épuration, dont Seine aval.

> **L'USINE SEINE AVAL** : premier site d'assainissement d'Île-de-France

Étendue : 800 ha principalement sur 3 communes : Achères, Maisons-Laffitte et Saint-Germain-en-Laye (78).

Mise en service : 1940.

Capacité de traitement : débit de référence fixé par arrêté inter-préfectoral de 2 300 000 m³/j, elle traite 1 496 000 m³/j (valeur 2018) en moyenne tout temps soit environ 58 % des eaux usées de l'agglomération parisienne.

Perspective : une station en mutation dans le cadre de sa refonte pour de meilleures performances épuratoires.

QUE SONT LES BOUES DE SEINE AVAL ?

Les boues sont constituées d'eau et de matière solides. Elles sont produites lors des différentes étapes de traitement des eaux usées. Sur l'usine Seine aval, deux types de boues sont produites, issus de procédés de traitement différents :

> **les boues thermiques** : digestion puis conditionnement thermique à 195°C pendant 45 minutes à 20 bars de pression, puis déshydratation sur filtre-pressé. Ce sont des boues solides (45% de matière sèche minimum), stables (limitent le caractère malodorant) et hygiénisées,

> **les boues centrifugées** : non concernées par la valorisation sur le périmètre d'épandage des boues de Seine aval en Eure-et-Loir. Boues déshydratées par centrifugation. Ce sont des boues pâteuses (20% de matière sèche en moyenne).

L'usine Seine aval produit environ 100 000 tonnes de boues (en matière brute) par an, dont 90 000 tonnes de boues thermiques. Chaque semaine, les boues thermiques produites sont analysées par un laboratoire accrédité COFRAC (52 analyses par an). Les résultats d'analyse sont connus avant que les boues ne quittent l'usine. Dans le cas où les boues sont conformes, elles sont destinées à la valorisation agricole par épandage direct ou compostage. Les boues non conformes, sont quant à elles, dirigées vers une Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND).

Une partie de la production de boues thermiques fait l'objet d'un compostage. Il s'agit d'un processus biologique qui, en présence d'oxygène, assure la transformation de matières organiques, telles que les boues stables et des déchets verts fermentescibles, en un produit stable, riche en composés humiques. Ce processus est similaire à celui de la dégradation naturelle des résidus organiques en substances humiques dans le sol, mais est réalisé de manière contrôlée sur des installations dédiées.

En matière de protection de la santé et de l'environnement, la réglementation en vigueur fixe des valeurs limites en éléments indésirables (éléments-traces métalliques et composés-traces organiques) à ne pas dépasser. Seules des boues thermiques conformes à ces critères réglementaires peuvent être valorisées en agriculture.

POURQUOI LA VALORISATION AGRICOLE ?

Le SIAAP a fait le choix du retour au sol pour les boues thermiques et composts de boues thermiques de Seine aval du fait de leur intérêt agronomique, à la fois comme engrais (apport de phosphore et de soufre) et comme amendement (apport de matières organiques et de calcium).

La matière organique contribue à améliorer le fonctionnement biologique général du sol, sa structure (porosité, aération) et sa capacité de rétention en eau. Ainsi, l'épandage des boues thermiques et de leurs composts participent à la limitation des phénomènes tels que le ruissellement, l'érosion et le tassement du sol.

Quant au phosphore, il constitue un fertilisant dit « de fond », qui participe à la nutrition des cultures. Ainsi, les boues thermiques de Seine aval sont valorisées en agriculture, en substitution d'engrais minéraux utilisés habituellement. Leur composition est contrôlée chaque semaine par un laboratoire accrédité COFRAC.

LA FILIÈRE DE VALORISATION DES BOUES DE SEINE AVAL

Les boues et certains composts de boues ont un statut de « déchet » au sens de l'article R211-27 du Code de l'Environnement (décret n°2015-890 du 21 juillet 2015). À ce titre, ils font l'objet d'un suivi réglementaire défini par l'arrêté ministériel du 08/01/98. Aussi, en sa qualité de producteur, le SIAAP est légalement responsable de leur valorisation en agriculture.

13 départements autorisés

Les boues thermiques sont valorisées en agriculture dans 13 départements, soit par épandage direct, soit après compostage.

Une fertilisation raisonnée

Le conseil agronomique dispensé par le prestataire du SIAAP permet aux agriculteurs de prendre en compte l'utilisation des boues dans leur programme de fertilisation. Ainsi, chaque agriculteur reçoit toutes les informations le concernant : analyses de sols, quantités de fertilisants apportées par les boues ou composts et compléments à prévoir en fonction des cultures semées.

Chaque année, un programme prévisionnel d'épandage, un registre d'épandage et un bilan agronomique sont transmis aux administrations qui contrôlent la filière (DDT et SATESE¹).

Une filière certifiée

Fortement impliqués dans une démarche qualité et d'amélioration continue, (ISO 9001 version 2015), le SIAAP et son prestataire se sont également engagés dans une démarche de Certification de Services, Qualicert, obtenue en 2004, pour faire valoir la qualité de la filière d'épandage des boues de Seine aval. Les audits annuels confirment depuis lors la certification. La certification a été renouvelée le 31 août 2017 pour une durée de 3 ans.

Le référentiel de certification « Filières d'épandage agricole de matières fertilisantes recyclées », répond au besoin de confiance des consommateurs et est un gage de transparence, de qualité et de régularité des prestations offertes. Il s'attache à la maîtrise des caractéristiques suivantes : pilotage et sécurisation de la filière, traçabilité (gestion et suivi par lots), information, prescriptions de bonne utilisation et intégration dans les pratiques agricoles de fertilisation raisonnée, formation et qualification des intervenants.

Une équipe dédiée à la mise en œuvre de la filière



Le SIAAP choisit la valorisation agricole pour recycler les boues. Cette solution s'inscrit dans la démarche de développement durable et répond à un réel besoin des exploitants agricoles en termes d'amendement des sols et de fertilisation des cultures.

Pour assurer la mise en œuvre et le suivi de la filière de valorisation agricole des boues de Seine aval, le SIAAP, par l'intermédiaire de marchés publics, fait appel à un prestataire, actuellement SEDE Environnement, entreprise spécialisée dans l'évacuation, le traitement et la valorisation de boues d'épuration et de déchets organiques et minéraux.







ANNEXE 2 :

Rapport du contrôle de l'affichage en mairie







**Enquête publique - Plan d'épandage des boues de l'usine Seine aval du SIAAP
Compte-rendu du contrôle de l'affichage les 9 et 10 septembre 2019**

Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie	Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie
ALLAINVILLE	09/09/2019		BAILLEAU-L'ÉVÊQUE	09/09/2019	
AMILLY	10/09/2019		BERCHÈRES-SAINT-GERMAIN	09/09/2019	
AUNAY-SOUS-CRECY	09/09/2019		BEVILLE-LE-COMTE	09/09/2019	







**Enquête publique - Plan d'épandage des boues de l'usine Seine aval du SIAAP
Compte-rendu du contrôle de l'affichage les 9 et 10 septembre 2019**

Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie	Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie
BAILLEAU-ARMENONVILLE	09/09/2019		BOISSY-EN-DROUAIS	09/09/2019	
BOISSY-LÈS-PERCHE	09/09/2019		BOUTIGNY-PROUAIS	10/09/2019	
BREZOLLES	09/09/2019		BU	10/09/2019	






**Enquête publique - Plan d'épandage des boues de l'usine Seine aval du SIAAP
Compte-rendu du contrôle de l'affichage les 9 et 10 septembre 2019**

Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie	Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie
CERNAY	09/09/2019		CHALLET	09/09/2019	
CHAMPSERU	09/09/2019		CHARTRES	09/09/2019	
CHARPONT	09/09/2019		CHATAINCOURT 1	09/09/2019	





**Enquête publique - Plan d'épandage des boues de l'usine Seine aval du SIAAP
Compte-rendu du contrôle de l'affichage les 9 et 10 septembre 2019**

Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie	Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie
CHATAINCOURT 2	09/09/2019		CLEVILLIERS	09/09/2019	
COLTAINVILLE	09/09/2019		CRECY-COUVE	09/09/2019	
CRUCEY-VILLAGES	09/09/2019		DAMMARIE	10/09/2019	







**Enquête publique - Plan d'épandage des boues de l'usine Seine aval du SIAAP
Compte-rendu du contrôle de l'affichage les 9 et 10 septembre 2019**

Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie	Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie
ECLUZELLES	09/09/2019		EPEAUTROLLES	09/09/2019	
ERMENONVILLE-LA-PETITE	09/09/2019		FAVIERES	09/09/2019	
FESSANVILLIERS-MATTANVILLIERS			FRANCOURVILLES	09/09/2019	







**Enquête publique - Plan d'épandage des boues de l'usine Seine aval du SIAAP
Compte-rendu du contrôle de l'affichage les 9 et 10 septembre 2019**

Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie	Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie
FRESNAY-LE-COMTE	10/09/2019		GARANCIÈRES-EN-DROUAIS	09/09/2019	
GARNAY	09/09/2019		GASVILLE-OISEME	09/09/2019	
HAPPONVILLIERS	10/09/2019		HOUVILLE-LA-BRANCHE	09/09/2019	




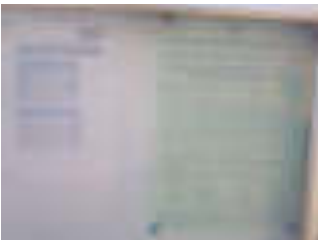

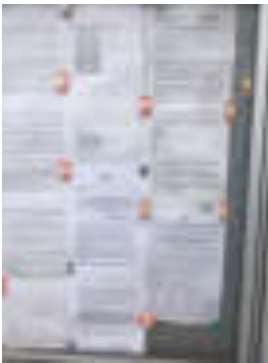
**Enquête publique - Plan d'épandage des boues de l'usine Seine aval du SIAAP
Compte-rendu du contrôle de l'affichage les 9 et 10 septembre 2019**

Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie	Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie
ILLIERS-COMBRAY	09/09/2019		JOUY	09/09/2019	
LA BOURDINIÈRE-SAINT-LOUP	10/09/2019		LE BOULLAY-LES-DEUX- EGLISES	09/09/2019	
LE BOULLAY-MIVOYE	09/09/2019		LE BOULLAY-THIERRY	09/09/2019	


**Enquête publique - Plan d'épandage des boues de l'usine Seine aval du SIAAP
Compte-rendu du contrôle de l'affichage les 9 et 10 septembre 2019**

Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie	Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie
LES CHATELLIERS-NOTRE-DAME	09/09/2019		LA CORVEES-LES-YYZ	10/09/2019	
LES VILLAGES-VOVEENS	09/09/2019		LOUVILLIERS-EN-DROUAIS	09/09/2019	
LURAY	09/09/2019		MAINVILLIERS	09/09/2019	

**Enquête publique - Plan d'épandage des boues de l'usine Seine aval du SIAAP
Compte-rendu du contrôle de l'affichage les 9 et 10 septembre 2019**

Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie	Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie
MARCHEVILLE	09/09/2019		MARVILLE-MOUTIERS-BRULE	09/09/2019	
MIGNIERES	10/09/2019		MITTAINVILLIERS-VERIGNY	10/09/2019	
MOINVILLE-LA-JEULIN	09/09/2019		NERON	09/09/2019	





**Enquête publique - Plan d'épandage des boues de l'usine Seine aval du SIAAP
Compte-rendu du contrôle de l'affichage les 9 et 10 septembre 2019**

Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie	Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie
NOGENT-LE-PHAYE	09/09/2019		NONVILLIERS-GRANDHOUX	10/09/2019	
OLLE	09/09/2019		ORMOY	09/09/2019	
OUERRE	09/09/2019		PRUNAY-LE-GILLON	09/09/2019	





**Enquête publique - Plan d'épandage des boues de l'usine Seine aval du SIAAP
Compte-rendu du contrôle de l'affichage les 9 et 10 septembre 2019**

Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie	Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie
PUISEUX	09/09/2019		SAINT-AVIT-LES-GUESPIÈRES	09/09/2019	
SAINT-DENIS-DES-PUITS	09/09/2019		SAINT-MAIXME-HAUTERIVE	09/09/2019	
SAINT-RÉMY-SUR-AVRE	09/09/2019		SAINT-SAUVEUR-MARVILLE	09/09/2019	

**Enquête publique - Plan d'épandage des boues de l'usine Seine aval du SIAAP
Compte-rendu du contrôle de l'affichage les 9 et 10 septembre 2019**

Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie	Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie
SAUMERAY	10/09/2019		SERAZEREUX	09/09/2019	
SOURS	09/09/2019		THIMERT-GÂTELLES	09/09/2019	
TREMBLAY-LES-VILLAGES	09/09/2019		TRÉON	09/09/2019	

**Enquête publique - Plan d'épandage des boues de l'usine Seine aval du SIAAP
Compte-rendu du contrôle de l'affichage les 9 et 10 septembre 2019**

Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie	Nom de la commune	Date de prise de vue de la photographie	Photographie
VERNOUILLET	09/09/2019		VERT-EN-DROUAIS	09/09/2019	
VILLEMEUX-SUR-EURE	09/09/2019		VOISE	09/09/2019	

ANNEXE 3 :

Rapport Publilégal de l'implantation des affiches sur les parcelles
agricoles



28210 - CHERVILLE - POINT 1 - D113 ROUTE DE CHERVILLE

Support : Piquet bois devant poubelle de tri

Descriptif



28700 - VOISE - POINT 2 - D122 DIRECTION VOISE

Support : Piquet bois

Descriptif





28120 - MARCHEVILLE - POINT 3 - 12 RUE DE LA MARE BENITE

Support : Panneau obligation

Descriptif



28120 - MARCHEVILLE - POINT 4 - 11 RUE DE COURVILLE

Support : Poteau téléphonique

Descriptif





28120 - MARCHEVILLE - POINT 5 - D129

Support : Piquet bois

Descriptif



28500 - MARVILLE-MOUTIERS-BRULE - POINT 6 - FACE AU 34 RUE D'ECLUZELLES (D309.4)

Support : Poteau électrique

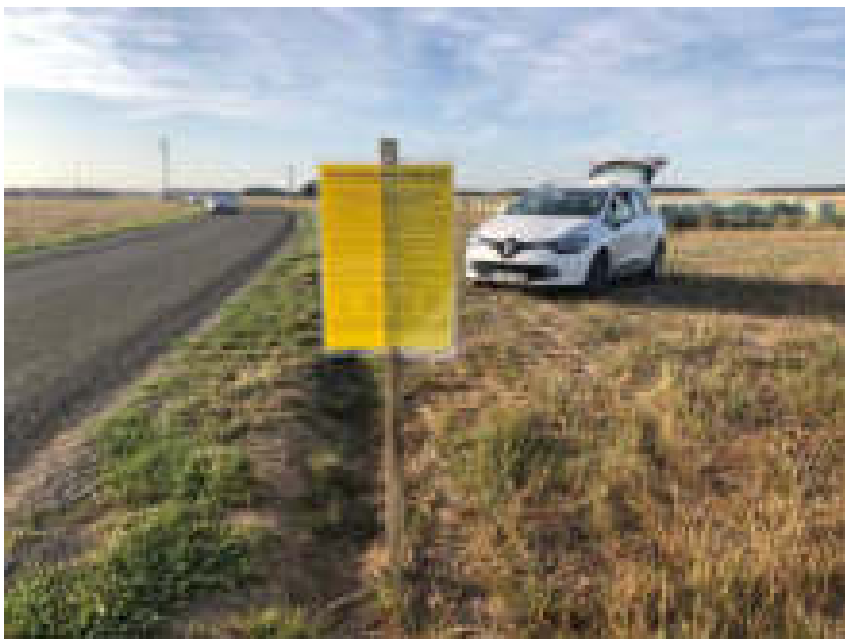
Descriptif



**28500 - LURAY - POINT 7 - D309.3 DEVANT BALLOTS DE PAILLE**

Support : Piquet bois devant ballots de paille

Descriptif

**28500 - MARVILLE-MOUTIERS-BRULE - POINT 8 - D309.1 APRÈS VIRAGE LE LONG DE LA N154**

Support : Piquet bois avant virage

Descriptif



**28210 - LE BOULLAY-MIVOYE - POINT 9 - D854 LONG DE LA N154**

Support : Piquet bois le long n154

Descriptif

**28500 - MARVILLE-MOUTIERS-BRULE - POINT 10 - ANGLE D309.1 ET D309.2**

Support : Poteau électrique devant le Château d'Eau

Descriptif



**28500 - MARVILLE-MOUTIERS-BRULÉ - POINT 11 - D309.1**

Support : Piquet bois sur d309.1 dans courbe 500m avant d113

Descriptif

**28360 - LA BOURDINIÈRE-SAINT-LOUP - POINT 12 - N10**

Support : Piquet bois

Descriptif





28190 - MITTAINVILLIERS - POINT 13 - ANGLE D342 ET IMPASSE DE LA VIEILLE VILLE

Support : Lampadaire

Descriptif



28190 - MITTAINVILLIERS - POINT 14 - D148 DIRECTION VERIGNY

Support : Piquet bois

Descriptif



**28700 - MOINVILLE-LA-JEULIN - POINT 15 - D119.1**

Support : Piquet bois au niveau chemin de terre avant Pont a

Descriptif

**28210 - FEUCHEROLLES - POINT 16 - ANGLE D104 RUE DE FEUCHEROLLES ET D326**

Support : Panneau direction

Descriptif



 **28210 - NERON - POINT 17 - ANGLE D104 ET D148**

Support : Piquet bois

Descriptif



 **28700 - COLTAINVILLE - POINT 18 - D134**

Support : Piquet bois

Descriptif



**28630 - NOGENT-LE-PHAYE - POINT 19 - D339.18**

Support : Piquet bois

Descriptif

**28630 - NOGENT-LE-PHAYE - POINT 20 - 4 RUE DU BOIS PARIS**

Support : Panneau direction

Descriptif



**28120 - NONVILLIERS-GRANDHOUX - POINT 21 - 2 RUE SAINT-VINCENT**

Support : Panneau direction

Descriptif

**28120 - NONVILLIERS-GRANDHOUX - POINT 22 - RUE DU CHATEAU D'EAU**

Support : Poteau téléphonique

Descriptif





28120 - NONVILLIERS-GRANDHOUX - POINT 23 - 7 D139.9

Support : Lampadaire

Descriptif



28120 - OLLE - POINT 24 - 11 RUE DE L'EGLISE

Support : Panneau obligation

Descriptif



**28210 - ORMOY - POINT 25 - ANGLE RUE DES FRAMBOISIERS ET RUE DE LA PLAINE**

Support : Signalisation panneau Rue

Descriptif

**28150 - VOVES - POINT 26 - D336 DIRECTION VOVES**

Support : Piquet bois devant bosquet

Descriptif





28210 - ORMOY - POINT 27 - ANGLE D127 RUE DES FORGES ET D26

Support : Panneau direction

Descriptif



28500 - CHARPONT - POINT 28 - CHEMIN DE TERRE APRÈS LE SENTIER DU DÉSSERT AU NIVEAU FOURCHE

Support : Piquet bois au niveau fourche sur chemin de terre

Descriptif



**28300 - BAILLEAU-L'EVEQUE - POINT 29 - D121.9 DIRECTION LÈVES**

Support : Piquet bois

Descriptif

**28360 - PRUNAY-LE-GILLON - POINT 30 - (D130) 6 RUE DE PRUNAVILLE**

Support : Lampadaire entrée village

Descriptif





28170 - PUISEUX - POINT 31 - 1 RUE DE LA DUNERIE

Support : Lampadaire

Descriptif



28120 - SAINT-AVIT-LES-GUESPIERES - POINT 32 - 3 LE MOULIN NEUF

Support : Panneau direction

Descriptif





28240 - LES CORVEES-LES-YYIS - POINT 33 - D128.5

Support : Piquet bois

Descriptif



28240 - SAINT-DENIS-DES-PUITS - POINT 34 - LA MARCAUDERIE

Support : Piquet bois

Descriptif



**28170 - SAINT-MAIXME-HAUTERIVE - POINT 35 - ANGLE (D133) ROUTE SAINT-NICOLAS ET ROUTE DE LA HOUSSAYE**

Support : Panneau direction

Descriptif

**28170 - THIMERT-GATELLES - POINT 36 - D140.15**

Support : Piquet bois devant monument

Descriptif





28500 - SAINT-REMY-SUR-AVRE - POINT 37 - D312.7 DANS IMPASSE EN DIRECTION N12

Support : Piquet bois

Descriptif



28170 - SAINT-SAUVEUR-MARVILLE - POINT 38 - D323.7 RUE DEVILLIERS

Support : Piquet bois

Descriptif





28120 - CHARONVILLE - POINT 39 - LA GRANDE EPINE

Support : Piquet bois

Descriptif



28170 - SERAZEREUX - POINT 40 - 1 RUE GEORGES GAREIL

Support : Piquet bois

Descriptif





28210 - ORMOY - POINT 41 - ANGLE D26 RUE DES TREAIES ET RUE DE LA PLAINE

Support : Piquet bois

Descriptif



28170 - SERAZEREUX - POINT 42 - D26.1 RUE DES TOURELLES

Support : Piquet bois 150 m avant Pont

Descriptif





28630 - GELLAINVILLE - POINT 43 - D939

Support : Piquet bois

Descriptif



28170 - THIMERT-GATELLES - POINT 44 - D324

Support : Piquet bois angle avec chemin de terre

Descriptif



**28170 - FAVIERES - POINT 45 - D133 DIRECTION FAVIERES**

Support : Piquet bois

Descriptif

**28170 - TREMBLAY-LES-VILLAGES - POINT 46 - ANGLE RUE DE CHAMPIGNY ET RUE DES GRENOUILLÈRES**

Support : Panneau direction

Descriptif





28170 - TREMBLAY-LES-VILLAGES - POINT 47 - 3 RUE DE LA PEROTTE GIRONVILLE

Support : Poteau électrique

Descriptif



**28170 - TREMBLAY-LES-VILLAGES - POINT 48 - ANGLE D148 RUE DE L'ESCALIER ET
CHEMIN DE TERRE**

Support : Lampadaire

Descriptif



**28170 - TREMBLAY-LES-VILLAGES - POINT 49 - ANGLE RUE DE LA PYRAMIDE ET D26**

Support : Piquet bois

Descriptif

**28170 - TREMBLAY-LES-VILLAGES - POINT 50 - 17 RUE DE LA CHARDONNIERE**

Support : Signalisation panneau Rue

Descriptif





28500 - TREON - POINT 51 - ANGLE RUE DU CHÂTEAU ET D'EAU RUE DE MONDETOUR

Support : Poteau électrique

Descriptif



28500 - VERNOUILLET - POINT 52 - 6 RUE MICHAEL FARADAY

Support : Piquet bois

Descriptif





28500 - VERT-EN-DROUAIS - POINT 53 - N12

Support : Piquet bois sur aire de l'arche

Descriptif



28500 - ALLAINVILLE - POINT 54 - 1 ROUTE DE LOUVILLIERS

Support : Lampadaire

Descriptif



**28300 - AMILLY - POINT 55 - ANGLE D121.5 ET D939**

Support : Panneau direction proche voie ferrée

Descriptif

**28320 - BAILLEAU-ARMENONVILLE - POINT 56 - D329.1**

Support : Piquet bois

Descriptif





28300 - BAILLEAU-L'EVEQUE - POINT 57 - CHEMIN DE TERRE AU BOUT RUE DU SOLEIL LEVANT

Support : Piquet bois

Descriptif



28300 - CHALLET - POINT 58 - D148

Support : Piquet bois

Descriptif



**28500 - BOISSY-EN-DROUAIS - POINT 59 - D134 PROCHE CHÂTEAU D'EAU**

Support : Piquet bois avant Château d'Eau

Descriptif

**28340 - BOISSY-LES-PERCHE - POINT 60 - D155 DIRECTION BOISSY LE PERCHE**

Support : Piquet bois au niveau pont ruisseau roule crotte

Descriptif





28410 - BOUTIGNY-PROUVAIS - POINT 61 - ANGLE D21 RUE DE LA FEE ET RUE DES VIGNES

Support : Piquet bois

Descriptif



28270 - BREZOLLES - POINT 62 - ANGLE ROUTE DE VERNEUIL ET ROUTE DE FESSANVILLIERS

Support : Lampadaire

Descriptif



**28410 - BU - POINT 63 - D21 EN DIRECTION DE BU PROCHE D147.6**

Support : Piquet bois

Descriptif

**28120 - CERNAY - POINT 64 - D108**

Support : Grille

Descriptif





28700 - CHAMPSERU - POINT 65 - D32

Support : Piquet bois

Descriptif



- - POINT 66 -

Support :

Descriptif





28000 - CHARTRES - POINT 67 - ANGLE CHEMIN DE FRESNAY ET D105 AVENUE GÉRARD PHILIPPE

Support : Piquet bois sur rond-point

Descriptif



28500 - CHATAINCOURT - POINT 68 - ANGLE D312 ET D312.3

Support : Panneau direction

Descriptif

Avant dépose





28300 - CLEVILLIERS - POINT 69 - ANGLE RUE DE LA MARE NEUVE (D121) ET D121.12

Support : Piquet bois

Descriptif



28500 - CRECY-COUVE - POINT 70 - D20

Support : Piquet bois

Descriptif





28270 - CRUCEY-VILLAGES - POINT 71 - D11.1 DIRECTION MAINTERNE

Support : Piquet bois dans virage

Descriptif



28360 - DAMMARIE - POINT 72 - 6 RUE DE LOCHE

Support : Lampadaire

Descriptif





28500 - LURAY - POINT 73 - CHEMIN DE TERRE AVANT D309.5 À CÔTÉ STAND DE TIR

Support : Piquet bois sur chemin de terre

Descriptif



28120 - EPEAUTROLLES - POINT 74 - 2 ROUTE DU MARCHAIS

Support : Piquet bois

Descriptif





- - POINT 75 -

Support :

Descriptif



28170 - FAVIERES - POINT 76 - ANGLE D133 ET ROUTE DES CALOTIERS

Support : Poteau électrique

Descriptif



**28270 - FESSANVILLIERS-MATTANVILLIERS - POINT 77 - 3 RUE DE LA MAIRIE**

Support : Poteau électrique

Descriptif

**28120 - ILLIERS-COMBRAY - POINT 78 - 5 LES DAUFFRAIS**

Support : Poteau téléphonique

Descriptif



📍 28300 - JOUY - POINT 79 - D136 DIRECTION JOUY

Support : Piquet bois

Descriptif



📍 28170 - LE BOULLAY-LES-DEUX- EGLISES - POINT 80 - ANGLE RUE DE BEAULIEU ET RUE DU POIRIER ST AIGNAN

Support : Lampadaire

Descriptif



ANNEXE 4 :

Courriers de dépôt du dossier (SIAAP/DDT)

SIAAP

Service public de l'assainissement francilien

Maisons-Laffitte, le 6 juin 2018

SITE SEINE AVAL

L'USINE DE PRODUCTION
DES BOUES DESHYDRATÉES
Affaire suivie par : Geoffrey GALLARD
Tél : 01 30 86 30 01
Avec l'assistance de son prestataire
SEDE Environnement
Tél : 01 34 93 25 58

N/Réf : SAV1MD01375

DDT de l'Eure-et-Loir
Service de la Gestion des Risques, de l'Eau de la
Biodiversité
Bureau Assainissement et Pollutions Diffuses
17 place de la République - CS 46517
28008 CHARTRES cedex

À l'attention de Mme Sophie LE GAIN

Objet : Demande d'Autorisation Environnementale pour l'épandage des boues du site Seine aval du SIAAP (78) dans le département de l'Eure-et-Loir

Madame,

Le SIAAP est autorisé à épandre les boues de l'usine d'épuration Seine aval dans le département de l'Eure-et-Loir par l'arrêté du 11 juin 2004, complété par celui du 14 janvier 2014, et par l'arrêté du 28 mai 2010. Ces arrêtés, valables respectivement pour une durée de 15 ans et 9 ans, arrivent à échéance au 27 mai et au 10 juin 2019. Un arrêté de prorogation en date du 8 janvier 2018 prolonge ces autorisations jusqu'au 8 juillet 2019.

L'instruction de la demande d'examen au cas par cas, par la Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DREAL) de la Région Centre-Val-de-Loire a statué le 26 juillet 2017 sur la nécessité de réaliser une étude d'impact.

Suite à cet avis et à votre courrier en date 13 novembre 2017, le dossier doit faire l'objet d'une demande d'autorisation environnementale unique avec évaluation environnementale.

J'ai donc l'honneur de vous faire parvenir 4 exemplaires de la demande d'autorisation environnementale, conformément à l'article R.214-1 du Code de l'Environnement.

Ce dossier est constitué des pièces suivantes :

- Le document « Liste des pièces à joindre au dossier d'autorisation environnementale » complété,
- Le document d'étude préalable (classeur 1/4),



PREFETE D' Eure-et-Loire

Direction Départementale
des Territoires de l'Eure-et-Loir

Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de
l'Agglomération Parisienne

Service Pollués de l'Eau de
l'Eure-et-Loir

BP 104
Route Centrale des Noyers

76630 MAISONS-LAFFITE CEDEX

Requiert par
M. LE GRIN

M. Lespès René (Syndicat Interdépartemental)

Tel : 02 37 20 40 77
Fax : 02 37 26 27 02

Objet : Autorisation environnementale au titre des articles L.141-1 et suivants du code
de l'environnement

PLAN EPARGNE BOUES STATION PURIFICATION ACHERES (28) (Seine /Avr)

Demande de compléments

Ref. CASCADF : 18-3818-0062
Ref. MARE : 29/2018/22

CHARTRES, le 07 JUIL 2018

Monsieur le Président,

Vous avez déposé un dossier de demande d'autorisation environnementale qui concerne les
procédures d'autorisation la sur l'eau et l'absence d'opposition au titre du régime d'évaluation des
incidences Natura 2000.

A l'occasion de l'examen par les services instructeurs, est apparue la nécessité de régulariser le
dossier présenté.

Je vous invite donc à me faire parvenir les éléments de réponse énumérés en annexe et à ce pouvoir
pursuivre l'instruction de votre dossier (9 exemplaires papier du dossier défini et un format
dématérialisé).

Vous disposez d'un délai de 5 mois pour faire parvenir ces différents éléments. Le délai
d'instruction prévu par l'article R.181-17 du code de l'environnement est suspendu jusqu'à la
réception de l'intégralité des éléments définis ci-dessous.

F.J. Liste des compléments à apporter au dossier - Article 1

Copie :
M. LESPES René, PLAN EPARGNE BOUES STATION PURIFICATION ACHERES (28) (Seine /Avr) (Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne)
2018/07/07 - demande de compléments n° 22

Préfecture de l'Eure-et-Loire, 10 rue de l'Horloge, 61000 Chartres
Téléphone : 02 37 20 40 77 - Fax : 02 37 26 27 02
Site Internet : www.eure-et-loire.fr

En l'absence de réponse de votre part dans le délai imparti, un arrêté de rejet de votre demande d'autorisation environnementale vous sera transmis.

Le service en charge de coordonner l'instruction de votre dossier peut toutefois être appelée au titre de cette page, se tient à votre disposition pour tout renseignement complémentaire.

Dans l'attente de vos compléments, je vous prie d'agréer, Monsieur le Président, l'expression de ma considération distinguée.

Le Chef de Service
de la Gestion des Permis,
de l'Équipement et de la Biodiversité périurbain



M. HURSAULT

Les informations recueillies font l'objet d'un traitement informatique destiné à l'instruction de votre dossier par un agent chargé de la police de l'eau en application du code de l'environnement. Conformément à la loi sur l'accès aux données du 6 juillet 1978, vous bénéficiez d'un droit de consultation et de modification des informations qui vous concernent. Si vous désirez exercer ce droit et obtenir une communication des informations vous concernant, veuillez adresser un courrier ou joindre un questionnaire de police de l'eau à votre correspondance, à l'adresse suivante : le directeur de l'eau et de la biodiversité du ministère de l'Énergie et du Climat.

Maisons-Laffite, le 28 novembre 2018

SITE SEINE AVAL

USINE DE PRODUCTION
DES BOUES DESHYDRATEES
Affaire suivie par : Céline CORVISY
Tél : 01 30 86 30 08
Avec l'assistance de son prestataire
SEDE Environnement
Tél : 01 34 83 23 55

SAV18003698

DDT de l'Eure-et-Loir
Service de la Gestion des Risques, de l'Eau de la
Biodiversité/
Bureau Assainissement et Pollutions Diffuses
17 place de la République - CS 40517
38008 CHARTRES cedex

À l'attention de Mme Sophie LE CAIN

Objet : Réponse à la demande de compléments - Autorisation Environnementale Unique pour l'épandage des boues de l'usine d'épuration Seine aval du SIAAP (78) dans le département d'Eure-et-Loir (dossier n°28-2018-00002).

Madame,

Suite au dépôt, du 6 juin 2018, du dossier de demande d'Autorisation Environnementale pour l'épandage des boues de l'usine Seine aval dans le département de l'Eure-et-Loir, vous nous avez fait parvenir le 6 juillet 2018 une demande de compléments afin de poursuivre l'instruction du dossier.

Vous trouverez joint à ce courrier, une note de réponse à votre demande de compléments ainsi que le dossier définitif en trois exemplaires papier et un exemplaire en version informatique.

Restant à votre entière disposition pour tout complément d'information, je vous prie d'accepter de recevoir, Madame, l'expression de ma considération très respectueuse.

Pièce de projets Service 4
SIAAP - Seine Aval


Céline CORVISY

PJ : - Note de réponses à la demande de compléments
- Dossier définitif de la demande d'autorisation environnementale (3 exemplaires papier et 1 exemplaire en version informatique)



ANNEXE 5 :

Publications scientifiques de résultats sur l'essai phosphore



Response of phosphorus dynamics to sewage sludge application in an agroecosystem in northern France



David Houben^{a,*}, Etienne Michel^a, Cécile Nobile^a, Hans Lambers^b, Ellen Kandeler^c, Michel-Pierre Faucon^{a,*}

^a AGHYLE, UniLaSalle, 19 rue Pierre Waguet, 60026 Beauvais, France

^b School of Biological Sciences and Institute of Agriculture, The University of Western Australia, 35 Stirling Highway, Crawley (Perth), WA 6009, Australia

^c Institute of Soil Science and Land Evaluation, Soil Biology, University of Hohenheim, Emil-Wolff Str. 27, 70599 Stuttgart, Germany

ARTICLE INFO

Keywords:

Hedley fractionation
Microbial phosphorus
Phosphatase
Phosphorus availability
Waste management

ABSTRACT

Sewage sludge is a phosphorus (P) source alternative to P fertiliser derived from rock phosphate, but its impact on soil processes driving P cycling in agroecosystems requires further study. In order to optimise the use of sludge for sustainable P fertilisation, we need to elucidate the drivers of P dynamics. The present study aims at determining how different sludges (heated sludge, HS and composted sludge, CS) affect soil P pools and dynamics. A field experiment was established and soil was amended either with sludge or with inorganic P (triple superphosphate, TSP). Soil samples were collected five times during a vegetation period, and analysed for Hedley P fractions, microbial P and phosphatase activity. Phosphorus dynamics in soil was strongly influenced by P concentrations in sludge. About one year after application, sludge with the highest P concentration (HS) was as effective as TSP to improve soil P availability. The P source of TSP was immediately available for plant uptake, but the high phosphatase activity of the HS treatment evidenced that soil microorganisms released phosphatases which can hydrolyse HS-derived organic P compounds. In addition, the high content of microbial P in the HS treatment suggests that soil microorganisms assimilate P into their own biomass. By contrast, sludge with the lowest P concentration (CS) enriched primarily the weakly-soluble soil P fractions, resulting in lower P availability compared with that in the TSP treatment. Our findings suggest that both high P concentration and slow, but continuous microbial breakdown of organic P substrates derived from HS allow using this resource as an important source for plant mineral nutrition. This study stresses the need to both characterise P concentrations and P forms in sludge, prior to their application in the field.

1. Introduction

Phosphorus (P) is a limiting nutrient for the productivity of many agroecosystems and indispensable to feed an ever-increasing human population (Filippelli, 2008; Withers et al., 2015). Currently, most of the P used in chemical fertilisers is derived from phosphate rocks that are finite and located in only a few places on Earth (Edixhoven et al., 2013; Reijnders, 2014). Developing sustainable fertilisation practices based on the use of renewable resources such as P-rich waste is thus essential to ensure long-term food security (Dawson and Hilton, 2011; Houben et al., 2017). Among P-rich wastes, sewage sludge appears an excellent candidate because it represents the largest component of recycled P, and due to the world's population growth, this reserve is expected to increase (Lwin et al., 2017). Its use in agriculture will likely increase, requiring continued vigilance in assessing the impacts of the

presence of potential pollutants such as metals, organic contaminants (e.g., pharmaceuticals and personal care products), emerging contaminants, viruses and other pathogens (Clarke and Smith, 2011). Since 1986, Council Directive No. 86/278/EEC has governed the use of sewage sludge in the European Union by prescribing testing of sludge and soil for a number of potential pollutants. This Directive has been implemented into the national legislation of member states, most often with stricter limits than that prescribed in the Directive (Kirchmann et al., 2017).

Because sewage sludge has a much lower P concentration than mineral P fertilisers, large amounts of sludge need to be transported to and applied on farms which may result in higher costs compared with mineral P fertilisers (Mackay et al., 2017a). Moreover, in contrast to conventional P fertilisers in which P is predominantly in a soluble form readily available to plants, sewage sludge contains a range of P forms

* Corresponding authors.

E-mail addresses: david.houben@unilasalle.fr (D. Houben), michel-pierre.faucon@unilasalle.fr (M.-P. Faucon).

<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.017>

Received 10 October 2018; Received in revised form 13 February 2019; Accepted 16 February 2019

Available online 26 February 2019

0929-1393/ © 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

with varying availability to plants (Kahiluoto et al., 2015). Phosphorus is present as a mixture of inorganic P forms including calcium (Ca) phosphates and amorphous aluminium (Al)- or iron (Fe)-bound P, while organic P generally represents a small fraction (Xie et al., 2011a). We already have solid evidence from different laboratory studies that the concentration of P in the soil solution, which is the form of P for plant uptake, after adding sewage sludge is controlled by the forms of P in sludge which depend on the origin and the treatment process of sludge (Frossard et al., 1996; Maguire et al., 2001). However, very little is known on changes in other soil P forms, and processes that are often driven by functional traits of plants and soil microorganisms (e.g., mycorrhizal colonisation, release of extracellular enzymes involved in P cycling) (Mackay et al., 2017b; Requejo and Eichler-Löbermann, 2014).

In addition to supplying P to the plant-available soil P pool through dissolution of inorganic P and mineralisation of organic P, sludge application can also alter P dynamics in soil by modifying abiotic and biotic soil properties (Faucon et al., 2015). Like other organic amendments, the presence of sludge in soil may enhance the activity of phosphatases (Bastida et al., 2008). Phosphatases are a broad group of enzymes that catalyse the hydrolysis of organic P, leading to the release of available ortho-phosphate. Recent findings have shown that organic P, rather than available P, is the most important P fraction in regulating phosphatase activity in soil (Margalef et al., 2017). Transformation of organic P through enzymatic reactions and its subsequent potential immobilisation by microbial biomass play a fundamental role in P dynamics, and is likely affected by the source of P (Saha et al., 2008). However, although studies about the effects of sewage sludge addition on soil biological properties have been numerous, they generally focused on one type of sludge (Criquet et al., 2007) and were carried out under controlled conditions, which do not fully mimic field scenarios. As a result, the extent of biological processes involved in situ in P cycling (i.e. organic P hydrolysis, P immobilisation) under different sludge sources has not been clearly identified, and it appears difficult to generalise previous results to different types of sewage sludge applied under field conditions.

Given the interest in using sewage sludge for P fertilisation, it is crucial to find out how its properties mediate both chemical and microbial processes affecting P cycling in agroecosystems. In particular, unravelling the role of sludge application in changes in soil P forms over time by characterising both chemical and microbial soil properties involved in P dynamics may shed light on the pathway of P release in sludge-amended soils. Ultimately, this knowledge helps predict the prospective P availability and establish the dose, frequency, and timing of sludge application. Therefore, this study aimed at gaining a better insight into the effects of sludge application on P lability and availability under field conditions, taking into account the impacts on soil microbial activities. We monitored shifts in soil P fractions over time (Hedley fractionation method; Tiessen and Moir, 2008) and determined phosphatase activity and microbial P in a field experiment using soil amended with two types of sewage sludge with different P concentrations. In order to estimate the potential of sludge to supply plant-available P relative to that by conventional P fertilisers, we also performed treatments with triple superphosphate (TSP). We hypothesised that i) changes in soil P availability would be driven by P composition of the sludge, and ii) sludge would increase microbial alkaline

phosphatase activity, possibly resulting in higher P availability over time.

2. Materials and methods

2.1. Sewage sludge properties

Two types of sewage sludge treated in different processes were provided by the Parisian public sanitation service (Seine Aval wastewater treatment plant, SIAAP, Paris). The first sludge (hereafter called heated sewage sludge, HS) was derived from a treatment process comprising P precipitation using ferric chloride, an anaerobic digestion, followed by a dewatering by thickening and thermal conditioning (heat exchange and heating at 195 °C and 20 bars). The second sludge (hereafter called composted sewage sludge, CS) was treated by anaerobic digestion followed by composting. Four biochemical fractions were determined using a modified Van Soest method (AFNOR, 2009): soluble (SOL), hemicellulose-like (HCE), cellulose-like (CEL) and lignin-like (LIG). The indicator of residual organic carbon (C), I_{ROC} , which represents the proportion of stable organic C was then calculated as (Lashermes et al., 2009):

$$I_{ROC} = 44.5 + 0.5 \times SOL - 0.2 \times CEL + 0.7 \times LIG - 2.3 \times MinC3$$

where I_{ROC} , SOL, CEL and LIG are expressed in % total organic C in sludge and MinC3 is the proportion (%) of mineralised organic C during the first three days of incubation (AFNOR, 2009). Organic C concentration, C/N ratio (AFNOR, 2013, 2012) and water-soluble P (WSP) concentrations (García-Albacete et al., 2012) were also determined. Phosphorus forms in sewage sludge were determined through the SMT (Standards, Measurements and Testing programme) protocol. The SMT method is a harmonised protocol proposed by the European Commission for sequential extraction of P initially in sediments which was then extended to other materials, including sewage sludge (García-Albacete et al., 2012; Medeiros et al., 2005). Briefly, inorganic P (IP) was extracted with 1 M HCl for 16 h and residues of this extraction were calcined for 3 h at 450 °C and then again extracted with 1 M HCl for organic P (OP). Non-apatite inorganic P (NAIP) associated with oxides and hydroxides of Fe, Al or Mn was extracted with 1 M NaOH for 16 h, and then some part of this extract was treated with 3.5 M HCl. The residues of this extraction were extracted for apatite P (AP) associated with Ca (Ca–P) with 1 M HCl for 16 h. Total P (TP) is the sum of OP and IP. As shown in Table 1, HS contains three times more total P than CS, while AP, NAIP and OP concentrations are 2.6, 11.4 and 2.8 times greater in HS than in CS.

2.2. Study site and experimental design

A field experiment was established in September 2015 in Beauvais, North of France (49°28'N; 2°4'W). The experimental site is included in a long-term (> 20 years) cropland field with an oilseed rape – winter wheat – winter barley rotation and an organic and mineral fertilisation based on soil tests, crop requirements, and timed to crop uptake. Cattle manure (25 Mg ha⁻¹) and lime amendments were applied, respectively, every three years, and six years before this experiment. Reduced tillage (5 cm of soil deep rotary harrow) was practiced since 2010. The oceanic

Table 1

Chemical properties of sludge. I_{ROC} : proportion of stable organic matter; Corg: organic carbon; WSP: Water-soluble phosphorus; AP: Apatite phosphorus; NAIP: Non-apatite inorganic phosphorus; OP: Organic phosphorus. Carbon and P concentrations are expressed in dry matter of sludge (g kg⁻¹MS). Values in parentheses represent the percentage of P in each fraction (%).

Sludge	I_{ROC}	pH	Corg (g kg ⁻¹)	C/N ratio	WSP (g kg ⁻¹)	AP (g kg ⁻¹)	NAIP (g kg ⁻¹)	OP (g kg ⁻¹)	Total P (g kg ⁻¹)
CS	79.9%	7.4	185	9.5	0.03 (0.2)	12.46 (74.9)	0.83 (5.0)	3.32 (19.9)	16.63
HS	80.8%	8.4	251	12.3	0.08 (0.2)	32.18 (63.2)	9.49 (18.6)	9.17 (18.0)	50.92

climate is characterised by an average precipitation of 669 mm year⁻¹. Average minimum and maximum temperatures vary from 1 to 6.7 °C in winter, 5 to 14.5 °C in spring, 12 to 23 °C in summer and from 7.2 to 15.3 °C in autumn. The studied soil was classified as a Haplic Luvisol (IUSS Working Group WRB, 2015). The soil texture was a silt loam with 12% sand, 66% silt and 22% clay. The soil pH_{H2O} was 7.53, the organic carbon concentration was 24 g kg⁻¹ and the cation exchange capacity was 15 cmol_c kg⁻¹. Given its soil properties and long-term fertilisation and cropping history, the study site is considered representative of the agricultural areas receiving the SIAAP sludge.

Five treatments were tested: two sludge amendments (HS and CS) were applied at a rate of 4.78 Mg dry matter ha⁻¹ (i.e. 7.5 Mg fresh matter ha⁻¹), which is based on common practices of farmers who use SIAAP sludge. Two mineral controls (triple superphosphate) adding the same quantity of P as in each sludge were also included (MHS for HS and MCS for CS) as well as a control without P fertilisation (C). A randomised complete block with four replicates per treatment was used. Each plot had an area of 40 m² (10 × 4 m) as used in Gallet et al. (2003). The experimental field had an area of 1000 m². The homogeneity of soil properties within the study area was previously assessed by a topsoil (0–5 cm) sampling (20 samples collected) and chemical characterisation. Before spreading sludge, the soil was tilled with a stubble cultivator in order to make the spreading homogeneous (5 cm depth). All the treatments were carried out on the 15th of September 2015. Then, the soil was again tilled with a harrow to incorporate the sludge following the French legislation. Winter barley (Viva, two-rowed cultivar) was sown on the 9th October 2015. Nitrogen application of 130 kg ha⁻¹ was based on a nitrogen balance calculation.

2.3. Plant sampling and analysis

Plants were harvested on 26th June 2016 and the crop was weighed on board of a harvester. After harvest, plants were dried at 70 °C for 72 h, weighed and then ground to 250 μm prior to analysis. Phosphorus concentrations in straw and grain were determined by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS, Thermo Scientific XSERIES2) after digesting the dried biomass in *aqua regia*. Briefly, 0.2 g of plant powder was mixed with 8 mL of concentrated HNO₃ and 2 mL of concentrated HCl directly in a microwave Teflon vessel (Lange et al., 2014) with a control without plant. The vessels (Easyprep 432175A, CEM μWaves) were placed in the microwave system (Mars 5, CEM Corporation, Charlotte, USA). The digestion programme consisted of a ramp time of 5 min to reach 180 °C and digestion was performed for 15 min. The power was set at 1600 W (Lange et al., 2014). The digest was then diluted to approximately 30 g (accurately weighed) and then stored until being analysed with ICP-MS.

2.4. Soil sampling and analysis

Two composite soil samples were collected at the surface (0–10 cm) within each plot in September (before and one week after fertilisation), January (during winter), May (during spring) and July (a few days after harvesting) to characterise P fractions, Olsen-P and soil chemical properties. Subsamples were used either fresh for microbial P and alkaline phosphatase activity (May and July) analyses or oven-dried (35 °C, 48 h), crushed and sieved through a 2-mm plastic sieve. Soil pH and electrical conductivity were measured in suspensions by shaking 2 g of soil with water (1:5 ratio). The Hedley et al. (1982) sequential fractionation method as modified by Tiessen and Moir (2008) was used to fractionate soil P. This method uses a sequence of increasingly strong extractants that remove labile inorganic P (Pi) and organic P (Po) forms first, then stable P forms. Briefly, 0.5 g of air-dried soil (ground to pass through a 2 mm sieve) was successively extracted with resin strips in deionised water (plant-available Pi), 0.5 M NaHCO₃ (pH 8.5) (Pi and Po adsorbed onto the soil surface), 0.1 M NaOH (Pi and Po held more strongly by sorption to surfaces of Al and Fe oxides), 1 M HCl (P

associated to Ca, derived from primary mineral-apatite). The last fraction (residual-P; stable Po forms and relatively insoluble Pi forms) was determined using a microwave digestion (Mars 5, CEM Corporation, USA) with *aqua regia* and hydrofluoric acid, EN 13656 (Gaudino et al., 2007). Labile P was considered the sum of resin-P and NaHCO₃-extracted P (Cross and Schlesinger, 1995; Tiessen and Moir, 2008). The Pi concentration in the extracts was determined colourimetrically using the molybdate blue method according to Murphy and Riley (1962) at 712 nm, as recommended by Tiessen and Moir (2008) to reduce possible interference from traces of organic matter. Total P (P_{tot}) in the extracts was determined by ICP-MS and the concentration of Po was estimated by subtracting Pi from P_{tot}. In addition to Hedley's fractionation, Olsen-P concentration was determined (Olsen, 1954).

2.5. Microbial phosphorus

Microbial P was determined by hexanol fumigation (Bergkemper et al., 2016) and extraction with anion-exchange membranes (VWR, 551642S). Anion-exchange membrane strips were prepared by initially shaking in 0.5 M NaHCO₃. For each sample, three portions of fresh soil (2 g on a dry-weight basis) were weighed into 50 mL bottles with 30 mL deionised water and two anion-exchange membrane strips. One bottle received 1 mL of hexanol and the samples were shaken for 16 h. The membranes were then removed and rinsed in deionised water and the phosphate (P_{fumigated}) recovered by shaking for 1 h in 20 mL (HCl 0.5 M). Another bottle only contained water and was treated the same way as previously (P_{non-fumigated}). To determine the amount of P retained by soil particles and complexation after fumigation incubation, a defined P concentration (KH₂PO₄), which was equal to the measured P concentrations in fumigated subsamples, was added to additional non-fumigated, but otherwise identically treated subsamples. Phosphorus concentrations were analysed colourimetrically (Murphy and Riley, 1962) using a spectrophotometer (712 nm). The ratio of recovered P to added P was used to calculate the P_{mic} concentration as follows (Nassal et al., 2018):

$$P_{mic} [\mu\text{g g}^{-1}] = \frac{(P_{\text{fumigated}} [\mu\text{g g}^{-1}] - P_{\text{non-fumigated}} [\mu\text{g g}^{-1}])}{(P_{\text{recovered}} [\mu\text{g g}^{-1}] / P_{\text{added}} [\mu\text{g g}^{-1}])}$$

2.6. Alkaline phosphatase activity

According to the pH of the soil (7.53), alkaline phosphomonoesterase (alkaline phosphatase) activity was assayed as an enzyme involved in P cycling. Alkaline phosphatase activity was assayed by the method of Tabatabai and Bremner (1969), which involves the determination of p-nitrophenol released by incubation at 37 °C for 1 h of 1 g soil with 0.2 ml toluene, 4 ml universal buffer and 1 ml substrate. Sodium p-nitrophenyl phosphate was used as substrate for assay of phosphatase activities (Eivazi and Tabatabai, 1977). The quantity of p-nitrophenol produced by alkaline phosphatase was measured using a spectrophotometer (410 nm).

2.7. Statistical analyses

All recorded data were analysed using descriptive statistics (mean ± standard error) and normality was determined using the Shapiro-Wilk test. The data were subjected to one-way ANOVA and Tukey's post-hoc test to compare treatments, which had a normal distribution. Data without normal distribution were subjected to the Kruskal-Wallis test and Mann-Whitney post-hoc test. Two-way ANOVAs were performed considering time as a fixed factor and fertilisation type as variable. All statistical analyses were performed using R software version 3.5.0. (R Core Team, 2017) and the package Rcmdr (Fox, 2005).

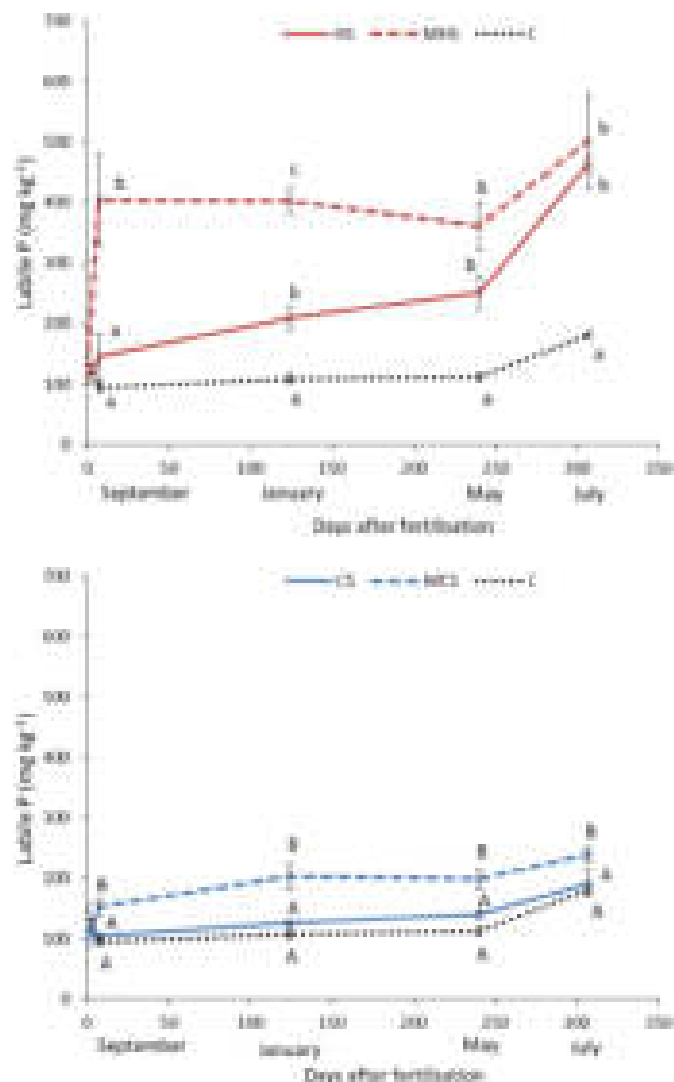


Fig. 1. Release of labile phosphorus (resin-P + NaHCO₃-extractable P) over time. C: No-P control; CS: Composted Sludge; HS: Heated Sludge; MHS: Mineral control of Heated Sludge. Different letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). Capital letter indicate differences between composted-sludge/Mineral control of CS/No-P control, lower case letter between heated sludge/Mineral control of HS/No-P control. Values are the mean of four replicates \pm standard error. Significant differences have been tested using Kruskal Wallis test for the comparison HS-MHS-C and One Way ANOVA for the comparison CS-MCS-C.

Table 2
Summary of two way ANOVA analysis.

	Treatment				Time				Treatment x Time			
	Df	MS	F	P	Df	MS	F	P	Df	MS	F	P
pH	4	0.7383	14.346	***	4	0.493	9.581	***	16	0.0479	0.931	NS
Olsen-P	4	128,613	104.216	***	4	52,886	42.854	***	16	9489	7.689	***
Resin-P	4	296.34	56.393	***	3	3.33	0.634	NS	12	5.44	1.035	NS
NaHCO ₃ -P	4	91.25	27.183	***	3	199.67	59.478	***	12	5.37	1.599	NS
NaOH-P	4	89.77	29.82	***	3	23.41	7.776	***	12	5.64	1.874	NS
HCl-P	4	56.92	1.898	NS	3	153.35	5.114	**	12	18.57	0.619	NS
Residual-P	4	658.5	18.343	***	3	577	16.073	***	12	47.3	1.316	NS

NS: non significant; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$.

3. Results

3.1. Sewage sludge properties

Table 1 indicates that CS and HS had a similar I_{ROC} and C/N ratio, while HS was slightly more alkaline than CS, and had a higher C concentration. For each sludge, NAIP was the predominant P form. The proportion of AP was slightly higher in HS, while the proportions of WSP and OP were similar between both sludges. More importantly, the total P concentration in HS was three times as high as that in CS, suggesting that the main difference between both sludges is not P fraction, but total P concentration.

3.2. Changes in labile P concentration over time

The effect of sludge addition on the labile P concentration (i.e. the sum of resin-P and NaHCO₃-P concentration) was strongly affected by the type of sludge applied (Fig. 1). After 124 days, the labile P concentration in the presence of HS was greater than that of the no-P control (C), but lower than the mineral control (MHS) ($\chi^2 = 9.85$, $df = 2$, p value < 0.01). However, after 240 days, the labile P concentration in HS was as high as that in MHS ($\chi^2 = 8.77$, $df = 2$, p value < 0.05). Unlike HS, labile P concentrations in the presence of CS were similar to that of C ($p > 0.05$) and significantly lower ($p < 0.05$) than its mineral control (MCS) for the duration of the experiment (Fig. 1). Despite differences in labile P concentrations among fertilisation treatments, P concentrations and quantity in shoot (straw) and grain were not significantly different among treatments (Supplementary Figs. 1, 2, 3).

3.3. Phosphorus forms and microbial-P in soil

Among the studied forms, only HCl-P was unaffected by fertilisation treatment, while only Resin-P was unaffected by time (Table 2). NaHCO₃-P, NaOH-P and residual P fractions were significantly affected by fertilisation treatment and also by time (Table 2). After 307 days (Fig. 2), HS significantly increased the NaHCO₃-Pi fraction and decreased the residual-P fraction compared with MHS and C. The NaOH-Po fraction was also significantly greater in the presence of HS compared with that in the other treatments. Moreover, only HS significantly increased the concentration of microbial-P in the soil (Fig. 3). In contrast with HS, CS had no effect on P forms in soil compared with both C and its mineral control (MCS).

3.4. Soil pH

Soil pH was influenced by fertilisation treatment and time (Table 2). The soil amended with MHS was significantly ($p < 0.05$) more acidic over the entire experimental period, while the pH did not differ significantly among the other treatments (Supplementary Fig. 4).

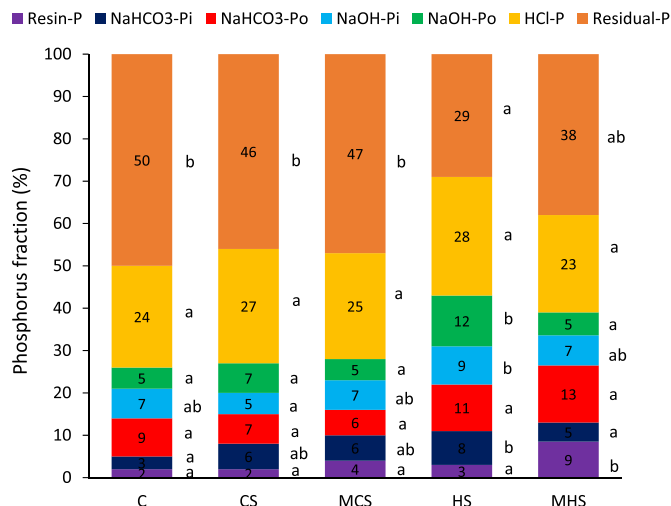


Fig. 2. Effect of sewage sludge application on phosphorus (P) fractionation (Hedley scheme) after 307 days. C: No-P control; CS: Composted Sludge; MCS: Mineral control of Composted Sludge; HS: Heated Sludge; MHS: Mineral control of Heated Sludge. The means with the same letters are not significantly different. Values are the mean of four replicates ± standard error. Significant differences have been revealed by a Kruskal-Wallis test with a Mann-Whitney post hoc test (Resin-P and NaOH-P) or One Way ANOVA with Tukey post hoc test. Phosphorus fractions are ordered by their availability (highest for Resin-P and lowest for Residual-P). *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

3.5. Alkaline phosphatase activity

Alkaline phosphatase activity was significantly increased by the application of HS while no significant difference was observed for the other treatments (Fig. 3).

4. Discussion

Most of previous studies investigating the P fertiliser potential of waste products such as sewage sludge have only focused on change in available P concentration after their application, disregarding how other soil P forms are affected. Here, our findings suggest, however, that P availability may change with time due to chemically and biologically controlled shifts in soil P fractions, which are themselves mediated by P concentrations in sludge.

4.1. Effect of sludge on labile P concentration over time

Monitoring labile P concentration over time is necessary to ensure

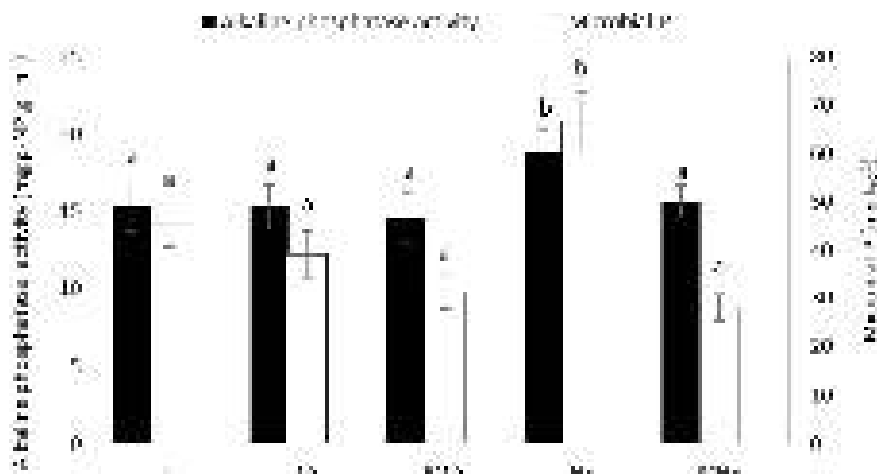


Fig. 3. Alkaline phosphatase activity (left y-axis) and microbial-phosphorus (P) (right y-axis) after 307 days. C: No-P control; CS: Composted Sludge; MCS: Mineral control of Composted Sludge; HS: Heated Sludge; MHS: Mineral control of Heated Sludge. Significant differences has been revealed using a Kruskal Wallis test with a Mann Withney post hoc test (for alkaline phosphatase) and One Way ANOVA followed by Tukey post hoc test. Values are the mean of four replicates ± standard error. The means with the same letters are not significantly different at the 5% level.

that P supplies will meet crop demand. Labile P can be continuously supplied to the soil solution, for instance, by organic P mineralisation through microbial activity and by mineral P desorption through chemical reactions (Chen et al., 2004; Sanyal and Datta, 1991). Chemical extractions have been extensively used to evaluate P lability in soils (Sharpley, 2009), even though they may be inappropriate in detecting changes produced by natural environmental soil modification such as cycles of alternating oxidation and reduction conditions (Scalenghe et al., 2014). Here, as recommended by Cross and Schlesinger (1995), we consider labile P to be the sum of resin-extractable P + NaHCO₃-extractable P. According to these authors, P extracted by ion exchange resins and NaHCO₃ solutions represents the most likely contributors to plant-available P over the course of a growing season, because it cycles readily through the microbial community and is made available to plant roots through a variety of chemical and biological processes. Our results reveal that HS significantly increased the labile P concentration over time (by 100% after 124 days). After 240 days, the HS treatment showed the same concentration of labile P as the mineral control (MHS). According to Huang et al. (2012), who observed an increase in P availability in sludge-amended soil after 100 days of incubation, the strong increase of labile P concentration in the presence of HS likely results from the continuous mineralisation of its large organic P pool (9.49 g kg⁻¹). This increase in P availability with time suggests that sludge with a high organic P concentration must be regarded as a slow-release P fertiliser. This slow-release P fertiliser behaviour has also been reported by Lemming et al. (2017). The authors showed that when applying a sludge similar to HS to a soil with pH 7.8, the efficiency in terms of available P relative to TSP increased from 20% to 46% after 84 days. Since many crops have high P demands in the early stage of their life cycle (Fageria, 2016), for example wheat plants take up 50–60% of their P in the first six weeks of growth (Römer and Schilling, 1986), there is a risk that the slow release of P from HS negatively impacts early plant growth. This might, however, be compensated by adding fertiliser mixtures of soluble P (e.g., TSP) and HS. In contrast with HS, CS did not influence the available P concentration. Since both sludges did not differ in their P fractions, it is likely that the much lower total P concentration in CS was the predominant driver of the lack of increase in P availability after addition to the soil (Welch et al., 2002). Due to its low total P concentration, the potential of CS to be used as a P fertiliser is thus limited, at least during the first year after its application, in such cropping systems. One possibility to mobilise the sparingly available CS-derived P might be to develop cropping systems with species having highly efficient P-acquisition strategy such as *Lupinus albus* L. (e.g., by intercropping it with cereals) (Hallama et al., 2019; Lambers et al., 2013). Further researches are however needed to determine to what extent this would counteract the limited P fertiliser potential of CS. Taken together, our results indicate that the efficacy of

sludge to increase P availability in soils would depend on the concentration and the forms of P added and the cropping system used.

It is important to note that the lack of any improvement of P concentration and quantity in plants in spite of the increase in available P concentration in soil after the addition of HS likely results from the already high P concentrations in these soils as a result of the long-term addition of P fertiliser (Gallet et al., 2003). According to Glæsner et al. (2019), a significant increase in P uptake might be expected in the long run, as P applied with sludge remained highly plant available in the soil after long-term application.

4.2. Phosphorus forms and concentrations in sludge influence P forms in soil

Interactions between P forms in sludge and P forms in soil are not fully understood so far, most studies focusing only on total and water-extractable P concentrations. As shown by other researchers using pot experiments (Frossard et al., 1996; Meyer et al., 2018; Nanzer et al., 2014), our results indicate that coupling the determination of P concentration and forms in sludge is, however, essential. Indeed, depending on total P concentration, P forms in sludge drive P distribution in various soil pools, which, in turn, impact P availability. By contrast to HS, CS had no effect on P distribution in soil pools compared with its mineral control (MCS). Since CS and HS had a relatively similar P composition (OP is ca 20% while insoluble AP + NAIP is ca 80% in both sludges), the lack of any effect of CS is thus most likely related to its much lower total P concentration.

The application of HS increased the NaHCO_3 -P pool, which is considered readily available to plants and is strongly related to P uptake by most crops (Saleque et al., 2004). However, some crops with highly efficient P-acquisition strategies (e.g., white lupine, canola) can access additional P fractions (Gardner et al., 1983; Hoffland et al., 1989). These results confirm the high potential of HS as a P fertiliser.

The application of HS also strongly increased the NaOH-P (Pi + Po) concentration. The NaOH-Pi pool is considered P sorbed to Al and Fe (hydr)oxides while NaOH-Po has been found to be predominantly associated with organic matter, namely fulvic and humic acids (Cassagne et al., 2000; Schroeder and Kovar, 2006; Tiessen and Moir, 2008). Although Al and Fe oxides are important P-sorbing components in soil (Hinsinger, 2001; Houben et al., 2011), it is unlikely that they act as a significant sink for P added by HS, since, even in the mineral controls, the fraction of P in the NaOH-Pi was not significantly increased compared with the control. The higher proportion of NaOH-Pi in HS-amended soil might be due to the high NAIP content in HS which results from the pre-treatment of this sludge (i.e. iron chloride precipitation) (Kahiluoto et al., 2015). On the other hand, the significantly higher NaOH-Po fraction following the application of HS probably results in part from the high concentration of organic P in this sludge (Malik et al., 2013; Smith et al., 2006). As a slowly exchangeable P pool (Frossard et al., 2000), the NaOH-P pool can be mobilised when P in soil solution is depleted from the soil by plant uptake (Guo et al., 2000; Saleque et al., 2004). Beck and Sanchez (1994) reported that NaOH-P is the dominant pool related to availability of P to plants in an 18-year continuously-cultivated and fertilised cropping system because it maintains the levels of plant-available P through P mineralisation. According to Crews and Brookes (2014), the NaOH-P pool holds P for years to decades before crop demand shifts the equilibrium in the soil solution and causes P to be released. In addition to increasing the readily-available P pool in soil, our findings suggest that the addition of HS might also supply available P in the long run. Further investigations will however, be necessary to determine the contribution of the NaOH-P pool to long-term P release and thus better predict the dynamics of P in sewage sludge-amended soils.

4.3. Phosphorus in microbial biomass

Microbial biomass plays a key role in P availability in

agroecosystems. It acts as a buffer by immobilising P from the soil solution and potentially preventing it from bonding with soil particles (Crews and Brookes, 2014). Microbial P is released when cells are disrupted, e.g., in response to sudden changes in soil temperature, water content, and carbon availability (Turner et al., 2003) or due to predation (Bonkowski, 2004), which results in an increase in available P (Oehl et al., 2001). Our results indicate that sludge application may have a strong impact on the microbial-P pool. By contrast to CS, which showed a similar microbial-P pool to its mineral control (MCS), HS application significantly increased the microbial-P pool compared with its mineral control (MHS). Andriamananjara et al. (2016) also observed a significant increase in microbial-P concentration after sewage sludge application compared with TSP. Consistently with Crews and Brookes (2014), this can be related to the increase of the NaOH-Po fraction brought about by this treatment, resulting in a stronger assimilation of P into soil microorganisms. Two different mechanisms might lead to the enrichment of P in soil microorganisms: 1. Soil microorganisms might grow faster due to the accelerated decomposition of organic P compounds, or 2. Soil microorganisms might change the stoichiometry of their cells toward a lower C/P ratio. Independently on the mechanism of P accumulation of soil microorganisms, the mean residence time of P in soil microorganisms is only 18 to 39 days and depends on soil P availability (Spohn and Widdig, 2017). Therefore, soil microorganisms represent a short-term storage of easily-available P fractions in soil, and store P somewhat longer in the case of restricted P access from soils. The P fraction stored in soil microorganisms is not only released by death of soil microorganisms, but also by the feeding behaviour of soil animals that require carbon resource to a higher extent than nutrients like P and N. This phenomenon, which was first described by Clarholm (1985) for protozoa, is now extended to a wider group of soil animals (protists, nematodes) and to other nutrients like P (Trap et al., 2016). Consequently, the importance of food webs in agroecosystems for biotic release of P derived from organic resources (like sludge) needs further study (Richardson and Simpson, 2011). Additional work including the characterisation of microbial biomass and structure of microbial community using phospholipid fatty acid analysis, sequencing and quantification of genes involved in P dynamic in soil (i.e. *phoB* and *phoR*) (Anderson et al., 2011) might be of help to better understand this microbial P increase in the presence of sludge.

4.4. Effect of sludge on alkaline phosphatase activity

The relationship between phosphatase activities and P in soil amended with sludge is still poorly understood, despite extensive investigations (Xie et al., 2011b). Phosphatase activities are expected to increase after application of organic matter, resulting in higher P availability in soil (Garg and Bahl, 2008). However, the response of phosphatase activities to applied organic waste also depends upon its initial constituents, amount and size, and must be investigated prior its application (Criquet et al., 2007; Saha et al., 2008; Tejada et al., 2008; Xie et al., 2011b) (Criquet et al., 2007; Saha et al., 2008; Tejada et al., 2008). Increases of alkaline phosphatase activity after the application of organic amendments have been primarily attributed to both the supply of easily decomposable organic compounds and change in soil pH (Dick et al., 2000; Garg and Bahl, 2008). In our study, application of HS did not affect soil pH. For this treatment, it can therefore be inferred that the supply of large amounts of substrates, including substrates for phosphatases (Bachmann et al., 2014), was the main process responsible for the stimulation of enzyme production by soil microorganisms (including mycorrhizal fungi). The stimulation of phosphatase activity is largely due to increased microbial numbers in the soil which, with time, cause a build-up of enzymes (Feder, 1973). Therefore, the higher alkaline phosphatase activity in the presence of HS is consistent with the higher NaOH-Po fraction and the subsequent increase in microbial-P concentration measured under this treatment. Unlike HS, CS application did not increase alkaline phosphatase

activity, most likely because it did not increase the soil organic P pool due to its low total P concentration, as discussed above (Margalef et al., 2017; Requejo and Eichler-Löbermann, 2014). In line with the recent efforts directed toward increasing P availability by mobilising recalcitrant soil P (Menezes-Blackburn et al., 2017), gaining insight into the factors responsible for the higher phosphatase activity in the presence of HS might help develop strategy to transform organic P to inorganic P available for plants. More generally, our data are consistent with the literature showing a positive effect of sewage sludge on the soil enzyme activities, with a positive correlation between rate of sludge application and enzyme activity (Fernandes et al., 2005; Siebielec et al., 2018).

4.5. Implications

Moving toward more sustainable sources for managing the P nutrition in agroecosystems, it is increasingly suggested to replace mineral fertilisers by P-rich materials originating from waste materials (Dawson and Hilton, 2011). In addition to studying the release of available P from these soil amendments, it is however essential to gain further insights into their indirect effects on the soil P pools, especially by paying attention to modifications of soil biota (Faucon et al., 2015). Here, our results showed that changes in soil biological properties after the addition of sewage sludge with high total P concentration (and 20% as organic P) contributed to increase the labile P concentration to a level as high as that of conventional fertiliser. It is necessary, however, to conduct further studies to identify the relative contribution of soil-derived P and sludge-derived P to this P lability increase, especially through the use of isotopic labelling techniques.

5. Concluding remarks

This study showed that the impact of sewage sludge with similar P fractions on P dynamics in agroecosystem is predominantly driven by total P concentration in sludge. Our findings suggest that, despite a relatively low water-soluble P concentration, the addition of sewage sludge with high total P concentration and 20% of total P as organic P has a great potential to improve sustainable P fertilisation, since it increased alkaline phosphatase activity and microbial-P, temporarily protecting P from fixation by soil particles. The positive effect of sludge with high total P concentration (and 20% as organic P) on the microbial-P pool and phosphatase activity is a pivotal result to understand the effects of organic waste on agroecosystem functioning, and, ultimately, to improve sustainable P fertilisation. Overall, our results stress the need that sludge provider measure both P concentration and P forms in sludge prior to their application in the field. The perspective is to elucidate the sludge's long-term effects on P pools and availability over the whole crop rotation in several soil types to define new sustainable practices of P fertilisation by taking into account both microbial and plant functional traits involved in P mobilisation/acquisition.

Acknowledgments

We thank the SIAAP wastewater treatment plant for funding and Thomas Pucheu from SEDE Environment for technical discussion. We also thank Vincent Hervé, Adeline Dubos, Sabine Rudolph, Petru Jitaru and Philippe Jacolot for technical assistance. Olivier Pourret, Sabine Houot, Frédéric Gérard and Isabelle Trinsoutrot-Gattin are acknowledged for their valuable comments to this research.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.017>.

References

- AFNOR, 2009. Norme XP U 44-162. Amendements organiques et supports de culture - Caractérisation de la matière organique par fractionnement biochimique et estimation de sa stabilité biologique. AFNOR, Paris.
- AFNOR, 2012. NF EN 16168 - Boues, biodéchets traités et sols - Détermination de la teneur totale en azote par combustion sèche. AFNOR, Paris.
- AFNOR, 2013. NF EN 15936 - Boues, bio-déchets traités, sols et déchets - Détermination de la teneur en carbone organique total (COT) par combustion sèche. AFNOR, Paris.
- Anderson, C.R., Condron, L.M., Clough, T.J., Fiers, M., Stewart, A., Hill, R.A., Sherlock, R.R., 2011. Biochar induced soil microbial community change: implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus. *Pedobiologia* 54, 309–320. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2011.07.005>.
- Andriamananjara, A., Rabeharisoa, L., Prud'homme, L., Morel, C., 2016. Drivers of plant-availability of phosphorus from thermally conditioned sewage sludge as assessed by isotopic labeling. *Front. Nutr.* 3. <https://doi.org/10.3389/fnut.2016.00019>.
- Bachmann, S., Gropp, M., Eichler-Löbermann, B., 2014. Phosphorus availability and soil microbial activity in a 3 year field experiment amended with digested dairy slurry. *Biomass Bioenergy* 70, 429–439. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.08.004>.
- Bastida, F., Kandeler, E., Moreno, J.L., Ros, M., García, C., Hernández, T., 2008. Application of fresh and composted organic wastes modifies structure, size and activity of soil microbial community under semiarid climate. *Appl. Soil Ecol.* 40, 318–329. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.05.007>.
- Beck, M.A., Sanchez, P.A., 1994. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a typic paleudult. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1424–1431. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050021x>.
- Bergkemper, F., Bünnemann, E.K., Hauenstein, S., Heuck, C., Kandeler, E., Krüger, J., Marhan, S., Mészáros, É., Nassal, D., Nassal, P., Oelmann, Y., Pistocchi, C., Schloter, M., Spohn, M., Talkner, U., Zederer, D.P., Schulz, S., 2016. An inter-laboratory comparison of gaseous and liquid fumigation based methods for measuring microbial phosphorus (P_{mic}) in forest soils with differing P stocks. *J. Microbiol. Methods* 128, 66–68. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2016.07.006>.
- Bonkowski, M., 2004. Protozoa and plant growth: the microbial loop in soil revisited. *New Phytol.* 162, 617–631. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01066.x>.
- Cassagne, N., Remaury, M., Gauquelin, T., Fabre, A., 2000. Forms and profile distribution of soil phosphorus in alpine Inceptisols and Spodosols (Pyrenees, France). *Geoderma* 95, 161–172. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00093-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00093-2).
- Chen, C.R., Condron, L.M., Davis, M.R., Sherlock, R.R., 2004. Effects of plant species on microbial biomass phosphorus and phosphatase activity in a range of grassland soils. *Biol. Fertil. Soils* 40, 313–322. <https://doi.org/10.1007/s00374-004-0781-z>.
- Clarholm, M., 1985. Interactions of bacteria, protozoa and plants leading to mineralization of soil nitrogen. *Soil Biol. Biochem.* 17, 181–187. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90113-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90113-0).
- Clarke, B.O., Smith, S.R., 2011. Review of 'emerging' organic contaminants in biosolids and assessment of international research priorities for the agricultural use of biosolids. *Environ. Int.* 37, 226–247. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2010.06.004>.
- Crews, T.E., Brookes, P.C., 2014. Changes in soil phosphorus forms through time in perennial versus annual agroecosystems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 184, 168–181. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.022>.
- Criquet, S., Braud, A., Neble, S., 2007. Short-term effects of sewage sludge application on phosphatase activities and available P fractions in Mediterranean soils. *Soil Biol. Biochem.* 39, 921–929. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.11.002>.
- Cross, A.F., Schlesinger, W.H., 1995. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma* 64, 197–214. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)00023-4](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)00023-4).
- Dawson, C.J., Hilton, J., 2011. Fertiliser availability in a resource-limited world: production and recycling of nitrogen and phosphorus. *Food Policy* 36, S14–S22. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.11.012>.
- Dick, W.A., Cheng, L., Wang, P., 2000. Soil acid and alkaline phosphatase activity as pH adjustment indicators. *Soil Biol. Biochem.* 32, 1915–1919. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00166-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00166-8).
- Edixhoven, J.D., Gupta, J., Savenije, H.H.G., 2013. Recent revisions of phosphate rock reserves and resources: reassuring or misleading? An in-depth literature review of global estimates of phosphate rock reserves and resources. *Earth Syst. Dyn. Discuss.* 4, 1005–1034. <https://doi.org/10.5194/esdd-4-1005-2013>.
- Eivazi, F., Tabatabai, M.A., 1977. Phosphatases in soils. *Soil Biol. Biochem.* 9, 167–172. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(77\)90070-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(77)90070-0).
- Fageria, N.K., 2016. *The Use of Nutrients in Crop Plants*. CRC Press.
- Faucon, M.-P., Houben, D., Reynoird, J.-P., Mercadal-Dulaurent, A.-M., Armand, R., Lambers, H., 2015. Advances and perspectives to improve the phosphorus availability in cropping systems for agroecological phosphorus management. *Adv. Agron.* 134, 51–79. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.06.003>.
- Feder, J., 1973. The phosphatases. In: Griffith, E.J., Beeton, A., Spencer, J.M., Mitchell, D.T. (Eds.), *Environmental Phosphorus Handbook*. J. Wiley and Sons, New York, pp. 475–508.
- Fernandes, S.A.P., Bettiol, W., Cerri, C.C., 2005. Effect of sewage sludge on microbial biomass, basal respiration, metabolic quotient and soil enzymatic activity. *Appl. Soil Ecol.* 30, 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2004.03.008>.
- Filippelli, G.M., 2008. The global phosphorus cycle: past, present, and future. *Elements* 4, 89–95. <https://doi.org/10.2113/GSELEMENTS.4.2.89>.
- Fox, J., 2005. The R commander: a basic-statistics graphical user interface to R. *J. Stat. Softw.* 14, 1–42. <https://doi.org/10.18637/jss.v014.i09>.
- Frossard, E., Sinaj, S., Zhang, L.-M., Morel, J.L., 1996. The fate of sludge phosphorus in soil-plant systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 1248–1253. <https://doi.org/10.2136/>

- sssaj1996.0361599500600040041x.
- Frossard, E., Condron, L.M., Oberson, A., Sinaj, S., Fardeau, J.C., 2000. Processes governing phosphorus availability in temperate soils. *J. Environ. Qual.* 29, 15–23. <https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900010003x>.
- Gallet, A., Flisch, R., Ryser, J.-P., Frossard, E., Sinaj, S., 2003. Effect of phosphate fertilization on crop yield and soil phosphorus status. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166, 568–578. <https://doi.org/10.1007/jpln.200321081>.
- García-Albacete, M., Martín, A., Cartagena, M.C., 2012. Fractionation of phosphorus biowastes: characterisation and environmental risk. *Waste Manag.* 32, 1061–1068. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.02.003>.
- Gardner, W.K., Barber, D.A., Parbery, D.G., 1983. The acquisition of phosphorus by *Lupinus albus* L. III. The probable mechanism by which phosphorus movement in the soil/root interface is enhanced. *Plant Soil* 70, 107–124. <https://doi.org/10.1007/BF02374754>.
- Garg, S., Bahl, G.S., 2008. Phosphorus availability to maize as influenced by organic manures and fertilizer P associated phosphatase activity in soils. *Bioresour. Technol.* 99, 5773–5777. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.10.063>.
- Gaudino, S., Galas, C., Belli, M., Barbizzi, S., de Zorzi, P., Jačimović, R., Jeran, Z., Pati, A., Sansone, U., 2007. The role of different soil sample digestion methods on trace elements analysis: a comparison of ICP-MS and INAA measurement results. *Accred. Qual. Assur.* 12, 84–93. <https://doi.org/10.1007/s00769-006-0238-1>.
- Gläser, N., van der Bom, F., Bruun, S., McLaren, T., Larsen, F.H., Magid, J., 2019. Phosphorus characterization and plant availability in soil profiles after long-term urban waste application. *Geoderma* 338, 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.046>.
- Guo, F., Yost, R.S., Hue, N.V., Evensen, C.I., Silva, J.A., 2000. Changes in phosphorus fractions in soils under intensive plant growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1681–1689. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6451681x>.
- Hallama, M., Pekrun, C., Lambers, H., Kandeler, E., 2019. Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. *Plant Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3810-7>.
- Hedley, M.J., Stewart, J.W.B., Chauhan, B.S., 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46, 970–976. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x>.
- Hinsinger, P., 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant Soil* 237, 173–195. <https://doi.org/10.1023/A:1013351617532>.
- Hoffland, E., Findenegg, G.R., Nelemans, J.A., 1989. Solubilization of rock phosphate by rape. 2. Local root exudation of organic-acids as a response to P-starvation. *Plant Soil* 113, 161–165. <https://doi.org/10.1007/BF02280176>.
- Houben, D., Meunier, C., Pereira, B., Sonnet, P., 2011. Predicting the degree of phosphorus saturation using the ammonium acetate-EDTA soil test. *Soil Use Manag.* 27, 283–293. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00353.x>.
- Houben, D., Hardy, B., Faucon, M.-P., Cornelis, J.-T., 2017. Effect of biochar on phosphorus bioavailability in an acidic silt loam soil. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 21, 209–217.
- Huang, X.-L., Chen, Y., Shenker, M., 2012. Dynamics of phosphorus phytoavailability in soil amended with stabilized sewage sludge materials. *Geoderma* 170, 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.11.025>.
- IUSS Working Group WRB, 2015. World reference base for soil resources 2014, update 2015 international soils classification system for naming soils and creating legends for soil maps. In: World Resources Reports No. 106. FAO, Roma, Italy, pp. 192.
- Kahiluoto, H., Kuisma, M., Ketola, E., Salo, T., Heikkinen, J., 2015. Phosphorus in manure and sewage sludge more recyclable than in soluble inorganic fertilizer. *Environ. Sci. Technol.* 49, 2115–2122. <https://doi.org/10.1021/es503387y>.
- Kirchmann, H., Börjesson, G., Kätterer, T., Cohen, Y., 2017. From agricultural use of sewage sludge to nutrient extraction: a soil science outlook. *Ambio* 46, 143–154. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0816-3>.
- Lambers, H., Clements, J.C., Nelson, M.N., 2013. How a phosphorus-acquisition strategy based on carboxylate exudation powers the success and agronomic potential of lupines (*Lupinus*, Fabaceae). *Am. J. Bot.* 100, 263–288. <https://doi.org/10.3732/ajb.1200474>.
- Lange, B., Faucon, M.-P., Meerts, P., Shutcha, M., Mahy, G., Pourret, O., 2014. Prediction of the edaphic factors influence upon the copper and cobalt accumulation in two metallophytes using copper and cobalt speciation in soils. *Plant Soil* 379, 275–287. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2068-y>.
- Lashermes, G., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Thuriès, L., Chaussod, R., Guillotin, M.L., Linères, M., Mary, B., Metzger, L., Morvan, T., Tricaud, A., Villette, C., Houot, S., 2009. Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. *Eur. J. Soil Sci.* 60, 297–310. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01110.x>.
- Lemming, C., Bruun, S., Jensen, L.S., Magid, J., 2017. Plant availability of phosphorus from dewatered sewage sludge, untreated incineration ashes, and other products recovered from a wastewater treatment system. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 180, 779–787. <https://doi.org/10.1007/jpln.201700206>.
- Lwin, C.M., Murakami, M., Hashimoto, S., 2017. The implications of allocation scenarios for global phosphorus flow from agriculture and wastewater. *Resour. Conserv. Recycl.* 122, 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.017>.
- Mackay, J.E., Cavagnaro, T.R., Jakobsen, I., Macdonald, L.M., Grønlund, M., Thomsen, T.P., Müller-Stöver, D.S., 2017a. Evaluation of phosphorus in thermally converted sewage sludge: P pools and availability to wheat. *Plant Soil* 418, 307–317. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3298-6>.
- Mackay, J.E., Cavagnaro, T.R., Müller Stöver, D.S., Macdonald, L.M., Grønlund, M., Jakobsen, I., 2017b. A key role for arbuscular mycorrhiza in plant acquisition of P from sewage sludge recycled to soil. *Soil Biol. Biochem.* 115, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.08.004>.
- Maguire, R.O., Sims, J.T., Dentel, S.K., Coale, F.J., Mah, J.T., 2001. Relationships between biosolids treatment process and soil phosphorus availability. *J. Environ. Qual.* 30, 1023–1033. <https://doi.org/10.2134/jeq2001.3031023x>.
- Malik, M.A., Khan, K.S., Marschner, P., Ali, S., 2013. Organic amendments differ in their effect on microbial biomass and activity and on P pools in alkaline soils. *Biol. Fertil. Soils* 49, 415–425. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0738-6>.
- Margalef, O., Sardans, J., Fernández-Martínez, M., Molowny-Horas, R., Janssens, I.A., Ciais, P., Goll, D., Richter, A., Obersteiner, M., Asensio, D., Peñuelas, J., 2017. Global patterns of phosphatase activity in natural soils. *Sci. Rep.* 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01418-8>.
- Medeiros, J.J.G., Cid, B.P., Gómez, E.F., 2005. Analytical phosphorus fractionation in sewage sludge and sediment samples. *Anal. Bioanal. Chem.* 381, 873–878. <https://doi.org/10.1007/s00216-004-2989-z>.
- Menezes-Blackburn, D., Giles, C., Darch, T., George, T.S., Blackwell, M., Stutter, M., Shand, C., Lumsdon, D., Cooper, P., Wendler, R., Brown, L., Almeida, D.S., Wearing, C., Zhang, H., Haygarth, P.M., 2017. Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review. *Plant Soil* 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3362-2>.
- Meyer, G., Frossard, E., Mäder, P., Nanzer, S., Randall, D.G., Udert, K.M., Oberson, A., 2018. Water soluble phosphate fertilizers for crops grown in calcareous soils – an outdated paradigm for recycled phosphorus fertilizers? *Plant Soil* 424, 367–388. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3545-x>.
- Murphy, J., Riley, J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27, 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5).
- Nanzer, S., Oberson, A., Huthwelker, T., Eggenberger, U., Frossard, E., 2014. The molecular environment of phosphorus in sewage sludge ash: implications for bioavailability. *J. Environ. Qual.* 43, 1050–1060. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.05.0202>.
- Nassal, D., Spohn, M., Eltlbany, N., Jacquiod, S., Smalla, K., Marhan, S., Kandeler, E., 2018. Effects of phosphorus-mobilizing bacteria on tomato growth and soil microbial activity. *Plant Soil* 427, 17–37. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3528-y>.
- Oehl, F., Oberson, A., Probst, M., Fliessbach, A., Roth, H.-R., Frossard, E., 2001. Kinetics of microbial phosphorus uptake in cultivated soils. *Biol. Fertil. Soils* 34, 31–41. <https://doi.org/10.1007/s003740100362>.
- Olsen, S.R., 1954. Estimation of Available Phosphorus in Soils by Extraction With Sodium Bicarbonate. USDA Circ 939. US Department Of Agriculture, Washington, D.C.
- R Core Team, 2017. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria ISBN3-900051-07-0. <https://www.R-project.org>.
- Reijnders, L., 2014. Phosphorus resources, their depletion and conservation, a review. *Resour. Conserv. Recycl.* 93, 32–49. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.09.006>.
- Requejo, M.I., Eichler-Löbermann, B., 2014. Organic and inorganic phosphorus forms in soil as affected by long-term application of organic amendments. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 100, 245–255. <https://doi.org/10.1007/s10705-014-9642-9>.
- Richardson, A.E., Simpson, R.J., 2011. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. *Plant Physiol.* 156, 989–996. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175448>.
- Römer, W., Schilling, G., 1986. Phosphorus requirements of the wheat plant in various stages of its life cycle. *Plant Soil* 91, 221–229. <https://doi.org/10.1007/BF02181789>.
- Saha, S., Mina, B.L., Gopinath, K.A., Kundu, S., Gupta, H.S., 2008. Relative changes in phosphatase activities as influenced by source and application rate of organic composts in field crops. *Bioresour. Technol.* 99, 1750–1757. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.049>.
- Saleque, M.A., Naher, U.A., Islam, A., Pathan, A.B.M.B.U., Hossain, A.T.M.S., Meisner, C.A., 2004. Inorganic and organic phosphorus fertilizer effects on the phosphorus fractionation in wetland rice soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 1635–1644. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1635>.
- Sanyal, S.K., Datta, S.K.D., 1991. Chemistry of phosphorus transformations in soil. In: Stewart, B.A. (Ed.), *Advances in Soil Science*. Springer, New York, NY, pp. 1–120. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3144-8_1.
- Scalenghe, R., Edwards, A.C., Barberis, E., Ajmone-Marsan, F., 2014. Release of phosphorus under reducing and simulated open drainage conditions from overfertilised soils. *Chemosphere* 95, 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.09.016>.
- Schroeder, P.D., Kovar, J.L., 2006. Comparison of organic and inorganic phosphorus fractions in an established buffer and adjacent production field. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 37, 1219–1232. <https://doi.org/10.1080/00103620600623533>.
- Sharpley, A.N., 2009. Bioavailable phosphorus in soil. In: *Methods Phosphorus Anal. Soils Sediments Residuals Waters*, pp. 38–43.
- Siebielec, G., Siebielec, S., Lipski, D., 2018. Long-term impact of sewage sludge, digestate and mineral fertilizers on plant yield and soil biological activity. *J. Clean. Prod.* 187, 372–379. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.245>.
- Smith, M.T.E., Cade-Menun, B.J., Tibbett, M., 2006. Soil phosphorus dynamics and phytoavailability from sewage sludge at different stages in a treatment stream. *Biol. Fertil. Soils* 42, 186–197. <https://doi.org/10.1007/s00374-005-0014-0>.
- Spohn, M., Widdig, M., 2017. Turnover of carbon and phosphorus in the microbial biomass depending on phosphorus availability. *Soil Biol. Biochem.* 113, 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.05.017>.
- Tabatabai, M., Bremner, J., 1969. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biol. Biochem.* 1, 301–307. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(69\)90012-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(69)90012-1).
- Tejada, M., Gonzalez, J.L., Hernandez, M.T., Garcia, C., 2008. Application of different organic amendments in a gasoline contaminated soil: effect on soil microbial properties. *Bioresour. Technol.* 99, 2872–2880. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.10.1016/j.soilbio.2017.08.004>.

- 06.002.
- Tiessen, H., Moir, J.O., 2008. Characterization of available P by sequential extraction. In: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Second edition. Taylor & Francis, Boca Raton, FL, pp. 293–306.
- Trap, J., Bonkowski, M., Plassard, C., Villenave, C., Blanchart, E., 2016. Ecological importance of soil bacterivores for ecosystem functions. *Plant Soil* 398, 1–24. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2671-6>.
- Turner, B.L., Driessen, J.P., Haygarth, P.M., Mckelvie, I.D., 2003. Potential contribution of lysed bacterial cells to phosphorus solubilisation in two rewetted Australian pasture soils. *Soil Biol. Biochem.* 35, 187–189. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00244-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00244-4).
- Welch, S.A., Taunton, A.E., Banfield, J.F., 2002. Effect of microorganisms and microbial metabolites on apatite dissolution. *Geomicrobiol J.* 19, 343–367. <https://doi.org/10.1080/01490450290098414>.
- Withers, P.J.A., van Dijk, K.C., Neset, T.-S.S., Nesme, T., Oenema, O., Rubæk, G.H., Schoumans, O.F., Smit, B., Pellerin, S., 2015. Stewardship to tackle global phosphorus inefficiency: the case of Europe. *AMBIO* 44, 193–206. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0614-8>.
- Xie, C., Tang, J., Zhao, J., Wu, D., Xu, X., 2011a. Comparison of phosphorus fractions and alkaline phosphatase activity in sludge, soils, and sediments. *J. Soils Sediments* 11, 1432–1439. <https://doi.org/10.1007/s11368-011-0429-1>.
- Xie, C., Zhao, J., Tang, J., Xu, J., Lin, X., Xu, X., 2011b. The phosphorus fractions and alkaline phosphatase activities in sludge. *Bioresour. Technol.* 102, 2455–2461. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.011>.

OPEN

Phosphorus-acquisition strategies of canola, wheat and barley in soil amended with sewage sludges

C. Nobile^{1*}, D. Houben¹, E. Michel¹, S. Firmin¹, H. Lambers², E. Kandeler³ & M.-P. Faucon¹

Crops have different strategies to acquire poorly-available soil phosphorus (P) which are dependent on their architectural, morphological, and physiological root traits, but their capacity to enhance P acquisition varies with the type of fertilizer applied. The objective of this study was to examine how P-acquisition strategies of three main crops are affected by the application of sewage sludges, compared with a mineral P fertilizer. We carried out a 3-months greenhouse pot experiment and compared the response of P-acquisition traits among wheat, barley and canola in a soil amended with three sludges or a mineral P fertilizer. Results showed that the P-acquisition strategy differed among crops. Compared with canola, wheat and barley had a higher specific root length and a greater root carboxylate release and they acquired as much P from sludge as from mineral P. By contrast, canola shoot P content was greater with sludge than with mineral P. This was attributed to a higher root-released acid phosphatase activity which promoted the mineralization of sludge-derived P-organic. This study showed that contrasted P-acquisition strategies of crops allows increased use of renewable P resources by optimizing combinations of crop and the type of P fertilizer applied within the cropping system.

Phosphorus (P) deficiency in soil restricts the productivity of many agroecosystems. Phosphorus fertilization is mainly based on the application of mineral fertilizer derived from mined phosphate rock, a finite resource which is steadily declining¹. To meet plant P requirements and sustain the growing population and need for food, we urgently need to explore new strategies that can provide available P for plants while limiting the use of mineral P fertilizer². One solution is recycling P from organic wastes that are rich in P, such as municipal sewage sludge, which represents the main resource of recycled P in the world^{3,4}. However, like other organic waste, sewage sludge contains a range of P forms with varying availability to plants compared with conventional P fertilizers in which P is predominantly in a soluble form readily available to plants. Phosphorus is present in sewage sludge as a mixture of both organic and inorganic P forms, in different proportions depending on the origin and the treatment process of sludge⁵. The dominant form of P-organic is inositol hexakisphosphate, phytate^{6,7}, while inorganic P forms include calcium (Ca) phosphates and amorphous aluminum (Al)- or iron (Fe)-bound P⁸. These forms need to be transformed to readily available P, which may, therefore, delay the sludge's fertilizer effect compared with mineral P fertilizer⁹. However, poorly-available P forms in soil or organic waste can be mobilized by some plants and microbes in P deficient soils^{10,11}.

Plants have evolved several strategies to improve P availability, especially *via* architectural, morphological and physiological root traits^{12,13}. These traits can be grouped in three main P-acquisition strategies: (i) a greater exploration of the soil induced by the development of specific root architecture and morphology; (ii) the mobilization of poorly-soluble inorganic P (Pi) and P-organic by the release of roots exudates, such as protons (H⁺) solubilizing Pi bound to Ca in alkaline soil¹⁴, or carboxylate increasing P desorption from mineral surfaces such as Al and Fe (hydr)oxides¹⁵; and (iii) the mineralization of P-organic induced by the production of enzymes such as acid phosphatases¹⁶. For a sustainable and efficient P fertilization, the challenge is to associate the application of organic waste with crops having traits involved in mobilization of poorly-available P forms.

Different P-mobilization and -acquisition strategies in crop species and cultivars have been highlighted, but their efficiency to acquire P from different P forms in substrates or soil remains poorly studied^{17,18}. Recent work

¹AGHYLE, SFR Condorcet FR CNRS 3417, UniLaSalle, 19 rue Pierre Waguët, 60026, Beauvais, France. ²School of Biological Sciences and Institute of Agriculture, The University of Western Australia, 35 Stirling Highway, Crawley (Perth), WA, 6009, Australia. ³Institute of Soil Sciences and Land Evaluation, Soil Biology, University of Hohenheim, Emil-Wolff Str., 27, 70599, Stuttgart, Germany. *email: cecile.nobile@unilasalle.fr

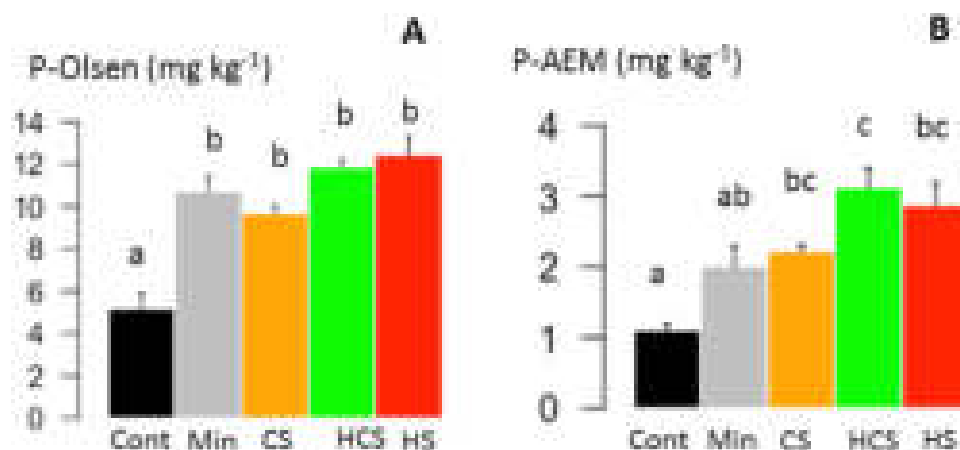


Figure 1. Phosphorus (P) extracted with the Olsen method (P-Olsen) (A) or with anion exchange membrane (P-AEM) (B) in a calcisol without P fertilization (Cont), fertilized with mineral P (Min), or fertilized with sewage sludge (CS: composted sludge, HCS: heated composted sludge, or HS: heated sludge), after three months without plants, to observe the effect of the fertilization treatment only. Error bars are standard errors ($n = 4$). Different letters indicate significant difference among fertilization treatments at the 0.05 level.

of Ceulemans *et al.*¹⁹ showed that some grassland species had preferential P acquisition from a P source over another, either organic or inorganic P, while others showed equal P acquisition of both P sources. These authors also showed that P acquisition of some grassland species was more efficient when multiple P sources were added to the soil, the addition of both organic and inorganic P to the soil inducing a higher shoot P content than the addition of one form only. However, the relationships between crop P-acquisition traits and preferential acquisition of P sources needs to be determined, especially in soil fertilized with various P forms, such as sewage sludge, compared with a mineral P fertilizer. This knowledge would allow increased use of renewable P resources by matching the type of fertilizer applied and the crop or cultivar with an efficient P-acquisition strategy, and in turn crop succession in crop rotations.

The impact of applied fertilizer on crop P content depends on the interactions with soil microbes, playing a key role in crop P acquisition²⁰. Organic waste application, by providing organic C^{21,22}, and plants, by releasing substrate or signaling molecules²³, can enhance the abundance and activity of microorganisms, which can improve P acquisition. The colonization of roots by arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) can greatly enhance the soil volume explored²⁴. Microorganisms can also exude carboxylate and phosphatases, but while plants produce principally acid phosphatases, microorganisms can produce both acid and alkaline phosphatases, phytases and phosphonate hydrolases²⁰. Therefore, the determination of favorable combinations of organic wastes and crop species requires to investigate plant-microbial interactions.

The objective of the present study was to examine P-acquisition strategies in three main crop species of conventional cropping system under application of different sewage sludges compared with a mineral P fertilizer. We carried out a greenhouse pot experiment and compared the response of P-acquisition traits among wheat, barley and canola in a calcareous soil that received three different sludges or mineral P (triple super phosphate). We hypothesized that (i) crop species studied have different P-acquisition strategies, and (ii) the efficiency of each strategy depends on the type of fertilizer applied. Results obtained could thus help to optimize cropping systems and notably crop rotation using organic waste.

Results

Soil phosphorus availability. The effect of sludges and mineral P fertilizer application on soil P availability was determined on soils without plants, three months after the application. The application of composted sludge (CS), heated composted sludge (HCS), heated sludge (HS) and mineral P fertilizer (Min) similarly increased the amount of P extracted with the Olsen method (P-Olsen) compared with the control soil (Fig. 1A). The P-Olsen was twofold higher in soils fertilized with sludge (11.3 mg kg⁻¹ on average for the three sludges) or mineral P fertilizer (Min: 10.7 mg kg⁻¹) than in the control soil (Cont: 5.1 mg kg⁻¹). Thus, the application at the same P dose of any of the three sludges had the same effect on soil P-Olsen as the application of mineral P fertilizer.

Amount of P extracted with anion exchange membranes (P-AEM) was two- or threefold higher in sludge-amended soils than in the control soil (Cont: 1.1 mg kg⁻¹), while mineral P fertilizer application had no effect on P-AEM compared with the control soil. The HCS (HCS: 3.1 mg kg⁻¹) induced a significantly higher P-AEM than the mineral P fertilizer (Min: 2.0 mg kg⁻¹) and did not differ from CS and HS treatments (Fig. 1B). Amount of P-Olsen was on average fourfold higher than amount of P-AEM (P-Olsen: 10.0 mg kg⁻¹ on average for all treatments; P-AEM: 2.3 mg kg⁻¹ on average for all treatments).

Shoot biomass and phosphorus content. Mineral fertilization as well as sludge addition increased the shoot biomass of canola and barley (Fig. 2). In contrast, the shoot biomass of wheat was only increased by mineral fertilization and heated sludge.

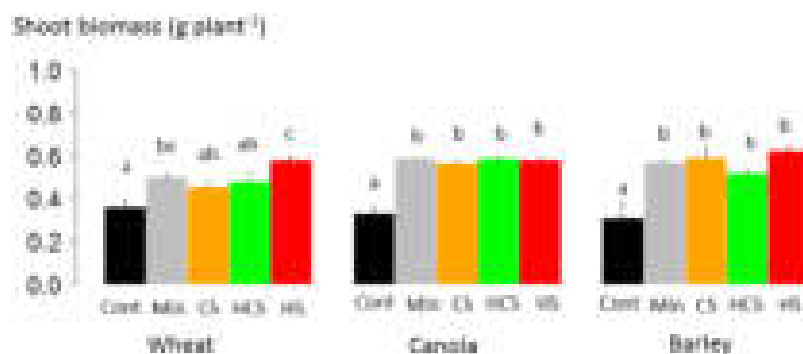


Figure 2. Dry shoot biomass of wheat, canola and barley after three months of growth in a greenhouse on a calcisol without phosphorus (P) fertilization (Cont), fertilized with mineral P (Min), or fertilized with sewage sludge (CS: composted sludge, HCS: heated composted sludge, or HS: heated sludge). Error bars are standard errors ($n = 4$). Different letters indicate significant difference among fertilization treatments at the 0.05 level.

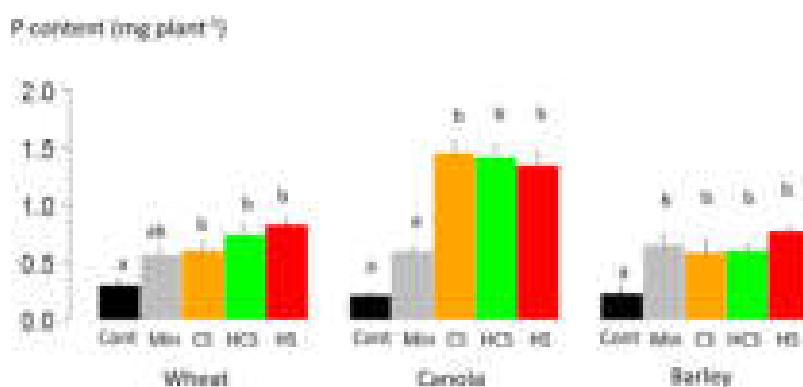


Figure 3. Shoot phosphorus (P) content of wheat, canola and barley after three months of growth in a greenhouse on a calcisol without P fertilization (Cont), fertilized with mineral P (Min), or fertilized with sewage sludge (CS: composted sludge, HCS: heated composted sludge, or HS: heated sludge). Error bars are standard error ($n = 4$). Different letters indicate significant difference among fertilization treatments at the 0.05 level; ns is not significant.

Shoot P content of canola was higher in soils fertilized with any of the three sludges than in soil fertilized with mineral P and in the control soil (Fig. 3). Shoot P content of canola was 2.5 times greater in soils fertilized with sludges ($1.4 \text{ mg plant}^{-1}$, on average for CS, HCS and HS) than in soil fertilized with mineral P ($0.6 \text{ mg plant}^{-1}$). By contrast, shoot P content of barley was similar in soils fertilized with sludge and mineral P and significantly higher than in the control soil. Barley P content was $0.66 \text{ mg plant}^{-1}$, on average, for CS, HCS and HS, and $0.66 \text{ mg plant}^{-1}$ for mineral P. Shoot P content of barley was similar in soils fertilized with any of the three sludges and with mineral P but was significantly higher with the sludges than in the control soil. Wheat shoot P content was $0.73 \text{ mg plant}^{-1}$, on average, for CS, HCS and HS, and 0.57 mg ind^{-1} for mineral P. Among the three crops, only canola had a significant greater P content in soils fertilized with sludge than from soil fertilized with mineral P.

Phosphorus-acquisition traits. Acid phosphatase activity in the rhizosphere soil was higher for canola than for wheat or barley in soils fertilized with mineral P, CS and HCS (Fig. 4A). The largest differences of acid phosphatase activity between canola and the two other crops were observed in the soil fertilized with mineral P, with $25 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ for canola, and $15 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ for wheat and $18 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ for barley. In contrast, alkaline phosphatase activity in the rhizosphere was similar for the three crops, except in the soil fertilized with HCS, where the activity was lower for canola than for wheat and barley (Fig. 4B).

Specific root length (SRL) was greater for barley than for wheat and canola in soils fertilized with any of the sludges (Fig. 4C). On average, for the three sludges SRL was 51 m g^{-1} for barley and 6 m g^{-1} for wheat and 2 m g^{-1} for canola. In the soil fertilized with mineral P, SRL was the same for barley (40 m g^{-1}) and wheat (36 m g^{-1}), and lower for canola (3 m g^{-1}).

Shoot canola Mn concentration (a proxy for carboxylate in the rhizosphere) was half of shoot wheat and barley Mn concentration in the soils fertilized with any of the sludges (Fig. 4D). Shoot Mn concentration was 41 mg g^{-1} , on average, for the three sludges for canola and 86.5 mg g^{-1} , on average, for wheat and barley. Total amounts of root carboxylate changed between species. With HS treatment, barley produced significantly higher carboxylate amount than wheat and canola which produced similar carboxylate amount; with Min treatment, barley produced significantly higher carboxylate amount than canola but similar amount than wheat; while with CS and HCS treatments, species produced similar amount of carboxylate (Fig. 4E). Barley produced much greater

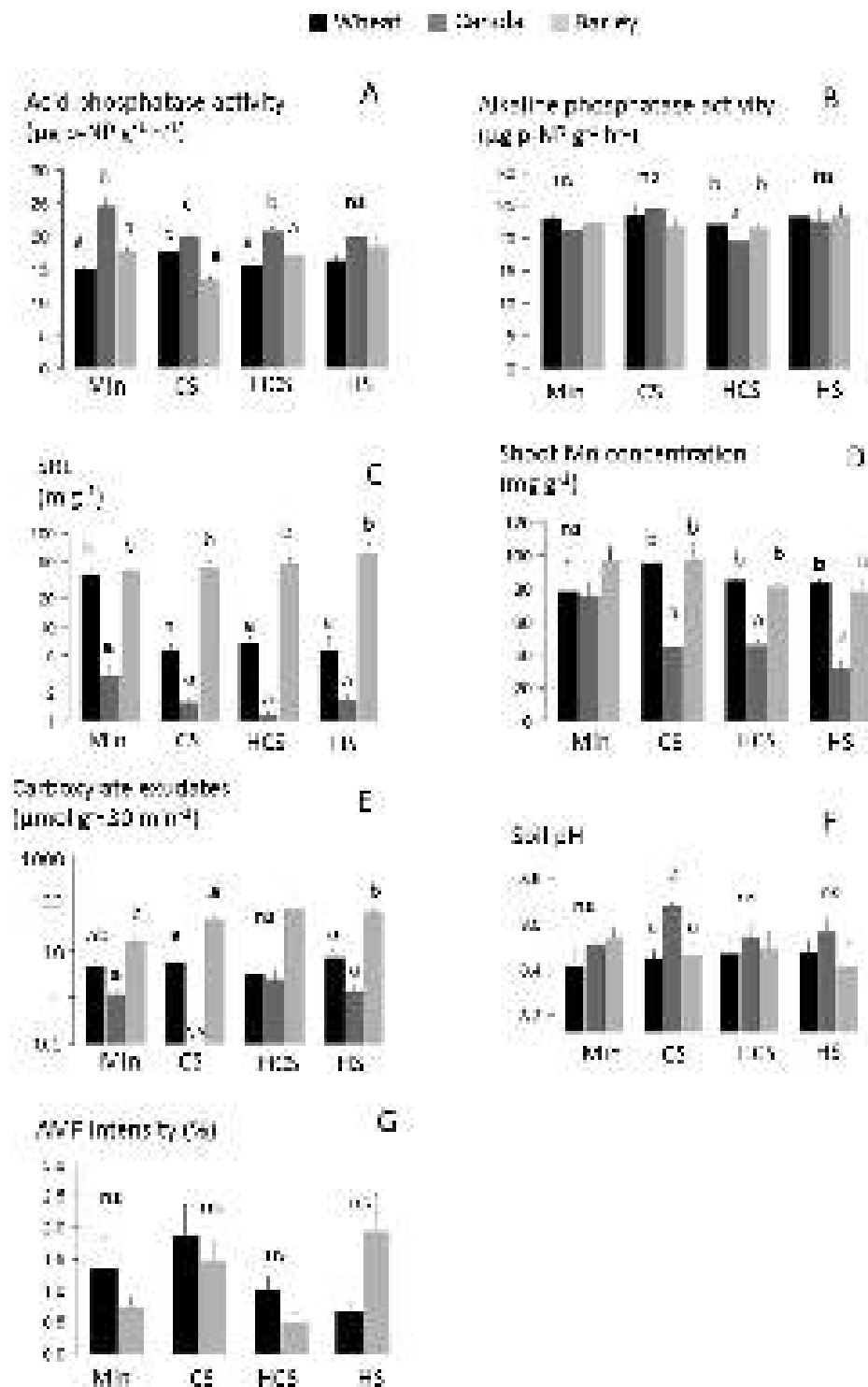


Figure 4. Traits involved in phosphorus (P) acquisition for wheat, canola and barley grown for three months in a calcisol fertilized with mineral P (Min), or fertilized with sewage sludge (CS: composted sludge, HCS: heated composted sludge, or HS: heated sludge). SRL: specific root length; Mn: manganese; AMF: arbuscular mycorrhizal fungi; as Brassicaceae are not colonized by AMF, AMF intensity was presented for wheat and barley only (4E). Error bars are standard errors ($n = 4$). NA is not available. Different letters indicate significant difference among crops at the 0.05 level; ns: no significant difference.

amounts of malonate (up to $68.6 \mu\text{mol g}^{-1} 30 \text{ min}^{-1}$ with HS) compared with wheat (up to $0.5 \mu\text{mol g}^{-1} 30 \text{ min}^{-1}$ with CS) and canola (up to $0.1 \mu\text{mol g}^{-1} 30 \text{ min}^{-1}$ with mineral P) (Fig. S1A). In addition, barley showed the greatest release of malate (up to $8.5 \mu\text{mol g}^{-1} 30 \text{ min}^{-1}$) (Fig. S1B) and wheat the greatest amount of citrate (up

	Unit, dry mass	CS	HS	HCS
I _{ROC} ^a	%	79.9	80.8	84
pH		7.4	8.4	7.3
C/N ^b		9.5	12.3	9.7
C organic ^b	g kg ⁻¹	185	251.0	170
N-total ^c	g kg ⁻¹	19.5	20.5	17.6
N-NH ₄	g kg ⁻¹	2.9	3.1	3.08
P-total	g kg ⁻¹	16.6	50.8	20
Pi-water ^d	mg kg ⁻¹	0.03	0.1	<1
	%P _{tot}	0.2	0.2	0.2
P-apatite ^e	mg kg ⁻¹	12.5	32.2	11.7
	%P _{tot}	75.3	63.4	58.5
Pi-non-apatite ^e	mg kg ⁻¹	0.8	9.5	4.0
	%P _{tot}	4.8	18.7	20.0
P organic ^e	mg kg ⁻¹	3.3	9.1	4.3
	%P _{tot}	19.9	17.9	21.5

Table 1. Properties and phosphorus fractions in sludges. CS: composted sludge; HS: heated sludge; HCS: heated composted sludge. ^aProportion of stable organic matter, XP U 44–162. ^bEN 15936. ^cEN 13342. ^dInorganic phosphorus extracted with water⁴⁴. ^eSMT (Standards, Measurements and Testing program) protocol⁴⁴.

	Unit	CalciSol
clay	%	56
silt	%	34
sand	%	11
pH-water ^a		8.3
CEC ^b	meq 100 g ⁻¹	19.2
C org ^c	g kg ⁻¹	37
Pi-water ^d	mg kg ⁻¹	<1
P total ^e	mg kg ⁻¹	810
Fe total ^e	g kg ⁻¹	14.8
Al total ^e	g kg ⁻¹	26.3
Ca total ^e	g kg ⁻¹	248

Table 2. Properties of the calciSol sampled at 0–15 cm and used for the pot experiment. ^aISO 10390. ^bISO 23470. ^cISO 10694. ^dInorganic P extracted with water determined by the molybdenum blue method⁴⁵. ^eAcid digestion and ICP-ES analysis.

to 5.9 $\mu\text{mol g}^{-1} 30 \text{ min}^{-1}$) (Fig. S1C), while canola showed the lowest (up to 1.1 $\mu\text{mol g}^{-1} 30 \text{ min}^{-1}$ for malate and 0.3 $\mu\text{mol g}^{-1} 30 \text{ min}^{-1}$ for citrate). All plants released very low amounts of fumarate and maleate (Fig. S1D,E).

Rhizosphere pH was similar for the three crops, except in soil fertilized with CS, in which the pH was slightly, but significantly higher for canola (pH: 8.5) than for wheat (pH: 8.4) and barley (pH: 8.4) (Fig. 4F). The intensity of roots colonization by AMF was similar for wheat and barley irrespective of the fertilization treatment (Fig. 4G).

Two-way ANOVA analysis testing the effects of fertilization treatment, type of crop, and their interaction on P-acquisition traits showed that the fertilization treatment impacted only phosphatases activities and shoot Mn concentrations (Table 3). The type of crop impacted acid phosphatase activity, SRL, shoot Mn concentration, pH, and intensity of roots colonization by AMF. The interaction between crop type and fertilization treatment impacted acid phosphatase activity, SRL, shoot Mn concentration, and intensity of roots colonization by AMF.

Covariation of P-acquisition traits, shoot biomass and P concentration. Figure 5 shows the results of the PCA performed on P-acquisition crop traits, shoot biomass and P concentration. The two principal components (PC) extracted by PCA accounted for 51% of the variance. The PC1 explained 39% of the variance and was negatively associated with shoot P concentration and acid phosphatase activity, and positively related to shoot Mn concentration and AMF intensity (Fig. 5A, Table S1). The PC2 explained 15% of the variance and was negatively correlated by shoot biomass, carboxylate exudates and specific root length (SRL).

Crops formed distinct groups along the PC1, wheat and barley points had positive values on PC1, while canola points had negative values (Fig. 5B). Barley and wheat points were spread on positive and negative values on PC2. When points were grouped by fertilization treatments, no clear patterns arose (Fig. 5C).

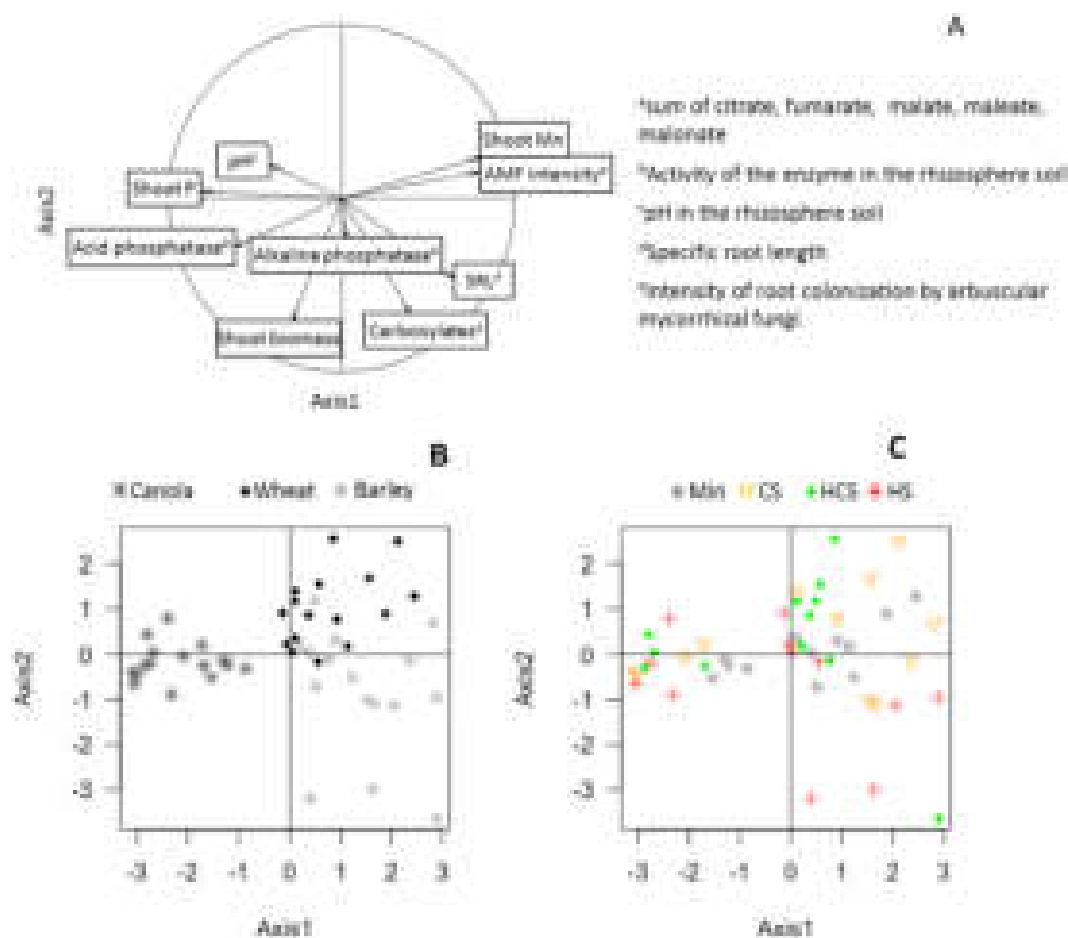


Figure 5. Variables projected in the plane determined by the first two principal axes (A) of a principal component analysis (PCA); positions of the points in the reduced space of the first two principal components after PCA grouped by crop (B) or fertilization treatment (Min: mineral P fertilizer, or fertilized with, CS: composted sludge, HCS: heated composted sludge, HS: heated sludge). (C) Control soil samples were not included in the analysis. Axes 1 and 2 accounted for 51% of the variance.

Discussion

Efficiency of crop species to acquire P may depend on the type of P fertilizer applied. Previous work suggested that plant species have different P-acquisition traits, leading to preferential sources for P acquisition^{17–19}. We hypothesized that the P-acquisition strategy of some crops could be more efficient in soil fertilized with organic waste, such as sewage sludge, than in soil fertilized with mineral P. The characterization of the relationships between the efficiency of P-acquisition strategies and type of fertilizer is a challenging step to optimize combinations of crop species or cultivars and P fertilizer type, thereby allowing more sustainable P fertilization practices.

The study of P-acquisition traits is needed to determine the different P-acquisition strategies of crops^{12,25}. Strategies of P-acquisition can be highlighted by multivariate analysis of the main architectural, morphological, biotic and physiological root traits involved in P-acquisition in crop species²⁶, i.e. the specific root length (SRL), leading to a greater volume of soil explored^{13,27}, the release of acid phosphatases into the rhizosphere, hydrolyzing P-organic¹⁶; the release of protons, solubilizing P bound to Ca¹⁴, and the release of carboxylate, increasing Pi or P-organic desorption from clay minerals and Al and Fe oxides and hydroxides²⁸, and the interactions with soil microbes, i.e. AMF root colonization and soil alkaline phosphatase activity. In our study, the PCA performed on P-acquisition traits, AMF colonization, alkaline phosphatase activity, shoot biomass and P concentration showed a clear separation by crop (Fig. 5B), indicating that the P-acquisition strategy depended on the nature of the crop. The shift in values along the PC1 clearly illustrates the contrasting P-acquisition strategy of canola compared with wheat and barley.

Canola was characterized by a high acid phosphatase activity in the rhizosphere, but a low SRL and a low carboxylate release (Fig. 5). The higher activity of acid phosphatase in the canola rhizosphere compared with that for wheat and barley (Fig. 4A) may result from a higher production by roots, and/or a higher stimulation of soil microbial activity that also produces acid phosphatase. However, a stimulation of microbial activity may also have increased the activity of alkaline phosphatase, produced by microbes only, while it was not observed here (Fig. 4B). In addition, a stimulation of microbial activity may have resulted from the release of carboxylate by roots, serving as substrate or signaling molecules to microbes²³, while in our study canola was the crop

	Crop				Treatment				Crop × Treatment			
	DF	MSq	F	p	DF	MSq	F	p	DF	MSq	F	p
Acid phosphatase ^a	2	125.82	43.39	***	3	9.22	3.18	*	6	18.81	6.49	***
Alkaline phosphatase ^a	2	3.36	0.95	NS	3	12.29	3.46	*	6	4.72	1.33	NS
SRL ^b	2	8501.32	61.51	***	3	230.77	1.67	NS	6	521.40	3.77	**
Mn concentration ^c	2	6458.09	35.59	***	3	941.69	5.19	**	6	481.86	2.66	*
Carboxylates ^d	2	9480.40	7.05	**	3	651.67	0.49	NS	5	912.58	0.69	NS
pH ^e	2	0.02	4.90	*	3	0.00	0.43	NS	6	0.00	1.13	NS
AMF ^f	2	7.79	23.05	***	3	0.86	2.56	NS	6	0.96	2.83	*

Table 3. Summary of two-way ANOVA analysis testing the effects of crop species, fertilization treatments, and their interaction on P-acquisition traits variations. Control soil samples were not included in the analysis. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. ^aActivity of the enzyme in the rhizosphere soil. ^bSpecific root length. ^cShoot Mn concentration. ^dSum of citrate, fumarate, malate, maleate, malonate exuded by roots the day of harvest. ^epH in the rhizosphere soil. ^fIntensity of root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi.

releasing the lowest amount of carboxylate (Fig. 4E). These findings suggest that the higher acid phosphatase activity resulted from a greater release by roots of canola, rather than a stimulation of microbial activity. These results are in line with Wang *et al.*²⁹, showing that canola produces more acid phosphatase than wheat and oat, and Tadano and Sakai³⁰, who found that other Brassicaceae (e.g., cabbage and radish) are characterized by a high activity of rhizosphere acid phosphatase. Canola was the crop releasing the lowest total amount of carboxylate (Fig. 4E), but the amounts of malate and citrate released were similar to high amounts recorded in the literature for canola³¹ (Fig. S1B,C). Carboxylate excreted can induce P release by directly replacing P on ligand exchange surfaces, such as clays and Al or Fe (hydr)oxydes, which is the case of citrate, and/or by complexing metal ions bind to P³¹. In addition, previous studies suggested that carboxylate excreted can acidify the rhizosphere soil and in turn increase the dissolution of Ca-P³², but here the release of carboxylate was not correlated with any change of pH. The absence of acidification could be explained by the large buffer capacity of the calcium carbonate of the calcisol used in this study. The lower shoot Mn concentration of canola compared with that for wheat and barley (Fig. 4D) supports the lower carboxylate exudation observed (Fig. 4E). Our study suggests that the P-acquisition strategy of canola comprises a high acid phosphatase in its rhizosphere which promotes P-organic hydrolyze into readily available Pi.

Wheat and barley were characterized by a low rhizosphere acid phosphatase activity, but a high SRL and a high carboxylate release, especially for barley (Fig. 4). Among the carboxylate measured in our study, barley released principally malonate and malate, while wheat released principally malate and citrate (Fig. S1). Malate and citrate are both usually released by many crops in response to P deficiency³³, however literature shows that wheat and barley release few amounts of carboxylate, except when they are Al-tolerant^{31,34}, which is likely the case here. Carboxylates release by Al-tolerant plant can increase with Al concentration in soil³⁴, but can also result from other toxicity. Christiansen-Weniger *et al.*³⁵ showed that Al-tolerant wheat cultivar release more carboxylates than Al-sensitive, but suggested that the release was independent of Al stimulation. In our study, barley released also very large amounts of malonate but only in soils fertilized with sludges (Fig. S1A), which may result from a P deficiency or from another stress induced by sludge application, such as an increase of metals concentration in soil. However, this result was surprising, as malonate is not a carboxylate usually released by Gramineous plants³³. The identification of carboxylate was performed by HPLC like in many studies, but a mass spectroscopy analysis should be down to confirm that the peak we identified corresponded to malonate or another carboxylate. The higher SRL of wheat and barley compared with canola corresponds to thinner roots and a larger root system, for an equivalent root biomass, and can thus lead to a higher volume of soil explored. Wang *et al.*³⁶ showed that barley had a greater total root length than canola with mineral P supply, but in their study this longer root system led to a higher P content for barley. In our study, the higher root length of wheat and barley did not lead to a higher P content than canola. This may result from the very low root colonization by AMF of wheat and barley, reaching a maximum of 3% in our study. Wang *et al.*²⁹ showed wheat root colonization by AMF can reach 32 to 40%. Roots AMF colonization is traditionally promoted in nutrient-deficient soils³⁷; in our study, Olsen-P in soil with sludges or mineral P application ranged from 10 to 12 mg kg⁻¹ (Fig. 1) and can be considered as medium compared with data reported in the literature^{38,39}. The low AMF colonization observed here most likely resulted from the lack of P deficiency in the fertilized soils, but can also result from the high soil pH, as pH is an important driver of fungal colonization of plants with AMF⁴⁰. These results suggest that crop P-acquisition relies only partly on additional microbial enhancement. Our study suggests that the P-acquisition strategy of wheat and barley is to release carboxylate, that can increase P desorption from soil minerals²⁸, and to develop long roots to increase the volume of soil explored.

Two contrasting P-acquisition strategies were determined: i) the strategy of crop species such as canola that stimulate the acid phosphatase activity, and ii) the strategy of crop species such as wheat or barley having a high SRL and a relatively high carboxylate release. These two strategies can have a different efficiency to take up P depending on the type of fertilizer applied, especially between the application of organic wastes adding organic P, such as sewage sludge, and the application of mineral P fertilizer. These different strategies can be used to optimize combination between the crop and the P fertilizer. For instance, crop species that stimulate the phosphatase activity might be more efficient to mineralize soil organic P, and thus to take up P in the presence of organic amendments, while crop species with a high release of carboxylate might be more efficient to acquire mineral

P sorbed onto soil constituents, and thus to take up P in the presence of mineral P fertilizer. Nevertheless, optimizing combinations between fertilizer types and crop species should also be determined regarding the fertilizer impacts on plant-microbial interactions leading to additional crop P-acquisition²⁰.

One of our hypothesis was that, in response to the supply of various forms of inorganic and P-organic, crop P-acquisition traits and interactions with microbial activity could have changed and increase the use of different P forms. Shahzad *et al.*⁴¹ have shown that organic amendments increased the amount of carboxylate in the rhizosphere of maize, while others studies have shown an increase of phosphatase activity in soil after sewage sludge application in incubation experiment²² or in the field^{9,42,43}. These increases were mainly explained by stimulation of microbial activity induced by organic matter applied. Nevertheless, our results show that, irrespective of crop species, sludge application had little impact on P-acquisition traits, and on interactions with microorganisms (Table 3). Alkaline phosphatase activity and AMF colonization were not enhanced by application of sludge compared with mineral P and the intensity of AMF colonization remained very low with the application of any of the three sludges (Fig. S2). The present study suggests that organic matter applied with sewage sludge was not sufficient to promote additional crop P acquisition by stimulation of microbial activity and that P-organic added with sludge did not increase the production of acid phosphatase. Houben *et al.*⁹ found a higher microbial activity in soil after the application of similar sludges than tested here, but only when a high dose was applied; the dose of sludge applied here was thus probably too low to stimulate soil microbial activity. The present study shows that P-acquisition traits of the studied species did not change between sludge application and mineral P fertilizer application, suggesting that the form of P added had no influence on P-acquisition traits.

The P-acquisition strategy of each crop changed little with type of fertilizer applied, but each strategy can have a different efficiency to improve P uptake depending on the type of fertilizer applied. Some P-acquisition strategies can be more efficient to take up P from soil fertilized with organic waste, such as sewage sludge, than in soil fertilized with mineral P^{17–19}. In our study, P-acquisition strategy of canola was particularly efficient to increase shoot P content from soil fertilized with sludge, as shoot P content of canola was higher in soil fertilized with any of the three sludges than with mineral P added at the same P dose (Fig. 3). Contrary to mineral P fertilizer, sludges contain P in organic forms (Table 1) and their application can thus increase the proportion of soil P-organic. As P-acquisition strategy of canola was to increase acid phosphatase activity in the rhizosphere, we can expect that the increase of acid phosphatase enhanced the mineralization of P-organic added with the sludge, which released Pi and, in turn, increased shoot P content of canola.

The contrasted efficiency of P-acquisition strategy of canola, wheat and barley can constitute a tool to optimize crop rotation with organic waste application. The present study shows that canola had the most efficient strategy to take up P from soil fertilized with sewage sludge, and potentially with other types of organic wastes. As sewage sludges slowly increase the plant-available soil P after their incorporation in soils⁹, canola should come first in the crop rotation, to improve crop P content from poorly-available P forms. Crop species such as wheat and barley that have a high SRL and a relatively high carboxylate release could be associated with soils having a high P-sorption capacity.

In conclusion, the P-acquisition strategy determined in soil fertilized with sewage sludge or mineral P was different for canola, and for wheat and barley. Wheat and barley had a higher specific root length and a higher root carboxylate release, and their shoot P content was equivalent with sludges or mineral P. By contrast, canola P content was higher with sludge, rather than mineral P was applied. This was attributed to its higher rhizosphere acid phosphatase activity which promoted mineralization of sludge-derived P-organic. Organic waste application should be associated with crop species such as canola with a high rhizosphere acid phosphatase activity in the rhizosphere.

One of the major challenges of P fertilization is to provide available P for plants while limiting the use of mineral P fertilizer. This study shows that the contrasting P-acquisition strategies of crops can be used to design efficient cropping systems with organic waste application.

Materials and Methods

Sewage sludges and soil. Three types of sewage sludge produced by the Parisian public sanitation service (Seine Aval wastewater treatment plant, SIAAP, Paris) were used: a composted sewage sludge (CS) treated by anaerobic digestion followed by composting with municipal green wastes; a heated sewage sludge (HS), treated by anaerobic digestion followed by a dewatering by thickening and thermal conditioning (heat exchange and heating during 45 min at 195 °C and 20 bars); and a heated and composted with municipal green wastes sludge (HCS). Sludge properties are given in Table 1. Phosphorus fractions were determined through the SMT (Standards, Measurements and Testing program) protocol⁴⁴. Four P fractions in sludge were considered: Pi-water (soluble inorganic P), P-apatite (calcium bound P), Pi-non-apatite (Pi bound to aluminum (Al), iron (Fe) and manganese (Mn) oxides and hydroxides), and P-organic. The three sludges had an equivalent P-organic fraction, but the sludges that received a thermal treatment (HS and HCS) had a lower P-apatite fraction.

A calcisol (IUSS Working Group WRB, 2014) was sampled (5–20 cm) in Fouquénies, located in the North of France (49°28'N 2°02'E). Soil was air-dried and sieved at 2 mm before being analyzed for pH (ISO 10390), cation exchange capacity (CEC) (ISO 23470), organic C (ISO 10694), N-total (EN 13342), N-NH₄, water-soluble Pi determined by the molybdenum blue method⁴⁵, total concentration of P, Ca, Al and Fe (acid digestion and ICP-ES analysis) (Table 2) and metallic trace elements (Table S2). The calcisol used was a clay loam soil with a high concentration of Ca (258 g kg⁻¹) and an initial low P availability (Pi-water < 1 mg kg⁻¹).

Greenhouse pot experiment. The three sludges were applied in pots containing 2.9 kg dry soil at the same P rate (0.06 g P kg⁻¹), corresponding to an agronomic dose of 75 kg P ha⁻¹. The mass of raw sludge applied correspondingly was 6 g kg⁻¹ dry soil for CS, 1.8 g kg⁻¹ dry soil for HS and 4.8 g kg⁻¹ dry soil for HCS. Triple superphosphate (TSP) was applied at the same rate (0.06 g P kg⁻¹) as a mineral control. Sludge and TSP were homogenized

through the soil by thorough hand mixing. A control without fertilization was also included. The experiment was carried out in six replicates. Distilled water was applied to reach field capacity and a nutrient solution was applied during the growth, corresponding to a total application of 1.17 g kg⁻¹ dry soil for N and 3.21 g kg⁻¹ dry soil for K.

Wheat (*Triticum aestivum* L. var. *bergamo*), barley (*Hordeum vulgare* L. 'Viva') and canola (*Brassica napus* L. var. *astronom*) were sown separately and grown for three months in a greenhouse with the following climatic conditions: 16 h of light day⁻¹, 24/16 °C (day/night). Eight seeds per pot of wheat and barley and four seeds of canola were sown. After one week, the plants were thinned to two plants per pot. A treatment without plant was also included. The experiment was carried out in six replicates. Distilled water was applied every two days during the growth period. After three months, aboveground parts and roots of plants were harvested separately. Rhizosphere soil, i.e. the soil adhering to the root surface within 2 mm after shaking, was collected and air dried.

Aerial parts of the plant were dried at 60 °C for 48 h, weighed and ground. A subsample was digested in 8 mL 65% nitric acid and 2 mL 37% hydrochloric acid in a microwave system (Mars 5, CEM Corporation, Charlotte, USA). Shoot P and Mn concentrations were determined by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS, Thermo Scientific XSERIES 2). Mature leaf Mn concentration is considered a proxy for rhizosphere carboxylate concentration^{28,46}.

Analyses of rhizosphere soil. *Soil phosphorus availability.* Soil phosphorus availability was assessed by anion exchange membrane⁴⁷ and the Olsen methods⁴⁸. The anion exchange membrane method involved mixing a mass of soil equivalent to 0.5 g dry soil with 60 mL of water and two anion exchange membranes (AEM) of 5 cm² loaded with HCO₃⁻ with an anion exchange capacity of 0.037 cmol_c cm⁻² for 16 h. Then, AEM were removed from the soil-solution mixture, rinsed with ultra-pure water, and eluted for 16 h in 20 mL of 0.5 M HCl. The Olsen extraction was performed by shaking the soil with 0.5 M NaHCO₃ at pH 8.5 (1:20 soil:liquid ratio) for 30 min. The concentration of P in each extract was then measured by ICP-MS (Thermo Scientific XSERIES 2).

Acid and alkaline phosphatase activities. Acid and alkaline phosphatase activities were assayed by the method of Tabatabai and Bremner⁴⁹ which involves the determination of p-nitrophenol released by incubation at 37 °C for 1 h of 1 g soil with 0.2 ml toluene, 4 ml universal buffer (pH 6.5 for acid phosphatase and pH 11 for alkaline phosphatase) and 1 ml sodium p-nitrophenyl phosphate as substrate⁵⁰.

Roots trait characterization. One plant per pot was used to collect carboxylate exudates. The day of harvest, after plants were removed from the soil and roots were cleaned with distilled water, the whole root system was dunked in 40 mL of 0.2 mM CaCl₂ solution for 30 min. The solution was then frozen and lyophilized to concentrate carboxylate, 2 mL was centrifuged (2 min, 10,000 g) and 1.5 mL of supernatant solution was filtered through a sterile 0.22 μm millipore filter. Fifty microliters of filtrate were injected into the HPLC system (Thermo Fisher, San Jose, CA, USA) equipped with an auto-injector, a degasser, and a diode array detector. Malate, malonate, maleate, citrate and fumarate were separated according the method of Cawthray⁵¹ on a reverse phase Luna 5 μm C18 column (250 mm 4 mm (phenomenex)) at 25 °C by using an isocratic mobile phase: 25 mM KH₂PO₄: methanol (99:1; v-v) buffered at pH 2.40. The flow rate was set at 1 mL min⁻¹. The UV signal was recorded at 210 nm.

The specific root length (SRL) was determined on the same plant used for exudate analysis. After collecting carboxylate exudates, roots were separated from the aerial part and total root length was determined using a scanner (Calibrated Color Optical scanner STD4800 with special lighting system. S/N URUW009925-6714112, Optical Resolution 4800 dpi, max. scan area: 22 × 30 cm) and WinRHIZO (Regent Instruments Inc., Quebec, Canada) software. The entire root was then dried at 60 °C for 48 h and weighed. The SRL was calculated as the ratio between total root length and root dry biomass.

The second plant of the pot was used to determine the intensity of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) root colonization for wheat and barley only. As most species belonging to Brassicaceae, canola cannot be colonized by AMF¹⁸. A root subsample of the plant was cleared in 10% (w/v) KOH, stained with trypan blue⁵², and 30 random sections of 1 cm were observed under a microscope (100x enlarged) to determine the percentage of root surface colonized by AMF. Six categories were used, 0: 0%, 1: 0–1%, 2: 1–10%, 3: 10–50%, 4: 50–80%, and 5: >80%. The intensity of AMF colonization of each plant was calculated as follow⁵³:

$$AMF \text{ intensity (\%)} = \frac{95n_5 + 70n_4 + 30n_3 + 5n_2 + n_1}{\text{number of sections colonized}}$$

with n_i the number of sections belonging to the category i .

Data processing and analysis. Data were statistically analyzed with the R package⁵⁴. A Kruskal-Wallis test followed by a Dunn test of multiple comparisons using ranked sums revealed significant differences ($p \leq 0.05$) among fertilization treatments or crop species. Two-way ANOVAs were performed to test the effects of crop species, the fertilization treatment and their interaction on the variations of each P-acquisition trait.

To examine the covariation of P-acquisition traits and P content regarding the crop or the fertilization treatment, a principal components analysis (PCA) was performed on the following variables: shoot P concentration (shoot P), shoot biomass, specific root length (SRL), intensity of AMF colonization (AMF intensity), total amount of carboxylate in rhizosheaths (carboxylate), shoot Mn concentration (shoot Mn), acid and alkaline phosphatase activities in the rhizosphere, and pH in the rhizosphere. The variables were submitted to PCA; rotated orthogonal components were extracted, and the relative scores were determined. Control soil samples were not included in the PCA in order to compare only soils that received the same amount of P.

Received: 11 July 2019; Accepted: 25 September 2019;

Published online: 16 October 2019

References

1. Reijnders, L. Phosphorus resources, their depletion and conservation, a review. *Resour. Conserv. Recycl.* **93**, 32–49 (2014).
2. Faucon, M. P. *et al.* Advances and perspectives to improve the phosphorus availability in cropping systems for agroecological phosphorus management. *Adv. Agron.* **134**, 51–79 (2015).
3. Lwin, C. M., Maung, K. N., Murakami, M. & Hashimoto, S. Scenarios of phosphorus flow from agriculture and domestic wastewater in Myanmar (2010–2100). *Sustain.* **9**, 1–15 (2017).
4. Ott, C. & Rechberger, H. The European phosphorus balance. *Resour. Conserv. Recycl.* **60**, 159–172 (2012).
5. Frossard, E., Sinaj, S., Zhang, L.-M. & Morel, J. L. The fate of sludge phosphorus in soil-plant systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **60**, 1248 (1996).
6. Toor, G. S., Hunger, S., Peak, J. D., Sims, J. T. & Sparks, D. L. Advances in the characterization of phosphorus in organic wastes: environmental and agronomic applications. *Adv. Agron.* **89**, 1–72 (2006).
7. Darch, T., Blackwell, M. S. A., Hawkins, J. M. B., Haygarth, P. M. & Chadwick, D. A meta-analysis of organic and inorganic phosphorus in organic fertilizers, soils, and water: implications for water quality. *Environ. Sci. Technol.* **44**, 2172–2202 (2014).
8. Xie, C., Tang, J., Zhao, J., Wu, D. & Xu, X. Comparison of phosphorus fractions and alkaline phosphatase activity in sludge, soils, and sediments. *J. Soils Sediments* **11**, 1432–1439 (2011).
9. Houben, D. *et al.* Response of phosphorus dynamics to sewage sludge application in an agroecosystem in northern France. *Appl. Soil Ecol.* **137**, 178–186 (2019).
10. Richardson, A. E. *et al.* Plant and microbial strategies to improve phosphorus efficiency of agriculture. *Plant Soil* **349**, 121–156 (2011).
11. Robles-Aguilar, A. A. *et al.* The effect of pH on morphological and physiological root traits of *Lupinus angustifolius* treated with struvite as a recycled phosphorus source. *Plant Soil* **434**, 65–78 (2019).
12. Li, L., Tilman, D., Lambers, H. & Zhang, F. S. Plant diversity and overyielding: Insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture. *New Phytol.* **203**, 63–69 (2014).
13. Strock, C. E., Morrow de la Riva, L. & Lynch, J. P. Reduction in root secondary growth as a strategy for phosphorus acquisition. *Plant Physiol.* **176**, 691–703 (2018).
14. Hinsinger, P. *et al.* Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? *Plant Soil* **348**, 29–61 (2011).
15. Richardson, A. E. & Simpson, R. J. Soil Microorganisms Mediating Phosphorus Availability. *Plant Physiol.* **156**, 989–996 (2011).
16. Lambers, H., Shane, M. W., Cramer, M. D., Pearce, S. J. & Veneklaas, E. J. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: Matching morphological and physiological traits. *Ann. Bot.* **98**, 693–713 (2006).
17. Turner, B. L. Resource partitioning for soil phosphorus: A hypothesis. *J. Ecol.* **96**, 698–702 (2008).
18. Lambers, H., Raven, J. A., Shaver, G. R. & Smith, S. E. Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age. *Trends Ecol. Evol.* **23**, 95–103 (2008).
19. Ceulemans, T. *et al.* Phosphorus resource partitioning shapes phosphorus acquisition and plant species abundance in grasslands. *Nat. Plants* **3** (2017).
20. Hallama, M., Pekrun, C., Lambers, H. & Kandeler, E. Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. *Plant Soil* **434**, 7–45 (2019).
21. Mäder, P. *et al.* Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* (80-). **296**, 1694–1697 (2002).
22. Crique, S., Braud, A. & Nèble, S. Short-term effects of sewage sludge application on phosphatase activities and available P fractions in Mediterranean soils. *Soil Biol. Biochem.* **39**, 921–929 (2007).
23. Schilling, G., Gransee, A., Deuhel, A., Ležovič, G. & Ruppel, S. Phosphorus availability, root exudates, and microbial activity in the rhizosphere. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkd.* **161**, 465–478 (1998).
24. Ferrol, N., Azcón-Aguilar, C. & Pérez-Tienda, J. Review: Arbuscular mycorrhizas as key players in sustainable plant phosphorus acquisition: An overview on the mechanisms involved. *Plant Sci.* **280**, 441–447 (2019).
25. Wen, Z. *et al.* Tradeoffs among root morphology, exudation and mycorrhizal symbioses for phosphorus-acquisition strategies of 16 crop species. *New Phytol.* **223**, 882–895 (2019).
26. Bardgett, R. D., Mommer, L. & De Vries, F. T. Going underground: Root traits as drivers of ecosystem processes. *Trends Ecol. Evol.* **29**, 692–699 (2014).
27. Vance, C. P., Uhde-Stone, C. & Allan, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytol.* **157**, 423–447 (2003).
28. Lambers, H., Hayes, P. E., Laliberté, E., Oliveira, R. S. & Turner, B. L. Leaf manganese accumulation and phosphorus-acquisition efficiency. *Trends Plant Sci.* **20**, 83–90 (2015).
29. Wang, Y. *et al.* Rhizosphere organic anions play a minor role in improving crop species' ability to take up residual phosphorus (P) in agricultural soils low in P availability. *Front. Plant Sci.* **7**, 1664 (2016).
30. Tadano, T. & Sakai, H. Secretion of acid phosphatase by the roots of several crop species under phosphorus-deficient conditions. *Soil Sci. Plant Nutr.* **37**, 129–140 (1991).
31. Jones, D. Organic acids in the rhizosphere - a critical review. *Plant Soil* **205**, 25–44 (1998).
32. Marschner, H. 15 - The Soil-Root Interface (Rhizosphere) In Relation to Mineral Nutrition. In *Mineral Nutrition of Higher Plants (second edition)* (ed. Marschner, H.) 537–595 (Academic Press, 1995).
33. Wang, Y. & Lambers, H. Root-released organic anions in response to low phosphorus availability: recent progress, challenges and future perspectives. *Plant Soil*, <https://doi.org/10.1007/s11104-019-03972-8> (2019).
34. Delhaize, E. *et al.* Aluminum Tolerance in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiol.* **103**, 685–693 (1993).
35. Christiansen-Weniger, C., Groneman, A. F. & van Veen, J. A. Associative N₂ fixation and root exudation of organic acids from wheat cultivars of different aluminium tolerance. *Plant Soil* **139**, 167–174 (1992).
36. Wang, Y.-L. *et al.* Contrasting responses of root morphology and root-exuded organic acids to low phosphorus availability in three important food crops with divergent root traits. *AoB Plants* **7**, 1–11 (2015).
37. Antunes, P. M., Lehmann, A., Hart, M. M., Baumecker, M. & Rillig, M. C. Long-term effects of soil nutrient deficiency on arbuscular mycorrhizal communities. *Funct. Ecol.* **26**, 532–540 (2012).
38. Horta, M. D. C. & Torrent, J. The Olsen P method as an agronomic and environmental test for predicting phosphate release from acid soils. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* **77**, 283–292 (2007).
39. Nawara, S. *et al.* A comparison of soil tests for available phosphorus in long-term field experiments in Europe. *Eur. J. Soil Sci.* **68**, 873–885 (2017).
40. Porter, W. M., Robson, A. D. & Abbott, L. K. Field survey of the distribution of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in relation to soil pH. *J. Appl. Ecol.* **24**, 659–652 (1987).
41. Shahzad, S. M. *et al.* Interaction of compost additives with phosphate solubilizing rhizobacteria improved maize production and soil biochemical properties under dryland agriculture. *Soil Tillage Res.* **174**, 70–80 (2017).

42. Hamdi, H. *et al.* Repetitive land application of urban sewage sludge: Effect of amendment rates and soil texture on fertility and degradation parameters. *Catena* **172**, 11–20 (2019).
43. Jorge-Mardomingo, I., Soler-Rovira, P., Casermeiro, M. Á., de la Cruz, M. T. & Polo, A. Seasonal changes in microbial activity in a semiarid soil after application of a high dose of different organic amendments. *Geoderma* **206**, 40–48 (2013).
44. García-Albacete, M., Martín, A. & Cartagena, M. C. Fractionation of phosphorus biowastes: Characterisation and environmental risk. *Waste Manag.* **32**, 1061–1068 (2012).
45. Murphy, J. & Riley, J. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* **27**, 31–36 (1962).
46. Pang, J. *et al.* The carboxylate-releasing phosphorus-mobilizing strategy can be proxied by foliar manganese concentration in a large set of chickpea germplasm under low phosphorus supply. *New Phytol.* **219**, 518–529 (2018).
47. Six, L., Pypers, P., Degryse, F., Smolders, E. & Merckx, R. The performance of DGT versus conventional soil phosphorus tests in tropical soils - An isotope dilution study. *Plant Soil* **359**, 267–279 (2012).
48. Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S. & Dean, L. A. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *Circular* **939**, 1–19 (1954).
49. Tabatabai, M. & Bremner, J. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biol. Biochem.* **1**, 301–307 (1969).
50. Eivazi, F. & Tabatabai, M. A. Phosphatases in soils. *Soil Biol. Biochem.* **9**, 167–172 (1977).
51. Cawthray, G. R. An improved reversed-phase liquid chromatographic method for the analysis of low-molecular mass organic acids in plant root exudates. *J. Chromatogr. A* **1011**, 233–240 (2003).
52. Kormanik, P. P., McGraw, A.-C. Quantification of vesicular-arbuscular mycorrhizae in plant roots. In *Methods and Principles of Mycorrhizal Research* (ed. Schenk, N. C.) 37–45 (1982).
53. Trouvelot, A., Kough, J. L. & Gianinazzi-Pearson, V. Mesure du taux de mycorrhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes de destination ayant une signification fonctionnelle. In *Physiological and Genetical Aspects of Mycorrhizae* (eds Gianinazzi-Pearson V. and Gianinazzi, S.) 217–221 (1986).
54. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. (2013).

Acknowledgements

We thank the SIAAP wastewater treatment for funding. We also thank Nicolas Honvault and Philippe Jacolot for technical assistance. Ellen Kandeler received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No. 677407 (SoilCare project).

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Additional information

Supplementary information is available for this paper at <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51204-x>.

Correspondence and requests for materials should be addressed to C.N.

Reprints and permissions information is available at www.nature.com/reprints.

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© The Author(s) 2019

