

Recyclage de déchets organiques en agriculture

Effets agronomiques et environnementaux de leur épandage

S. Houot, M.-N. Pons, M. Pradel, A. Tibi, coord.

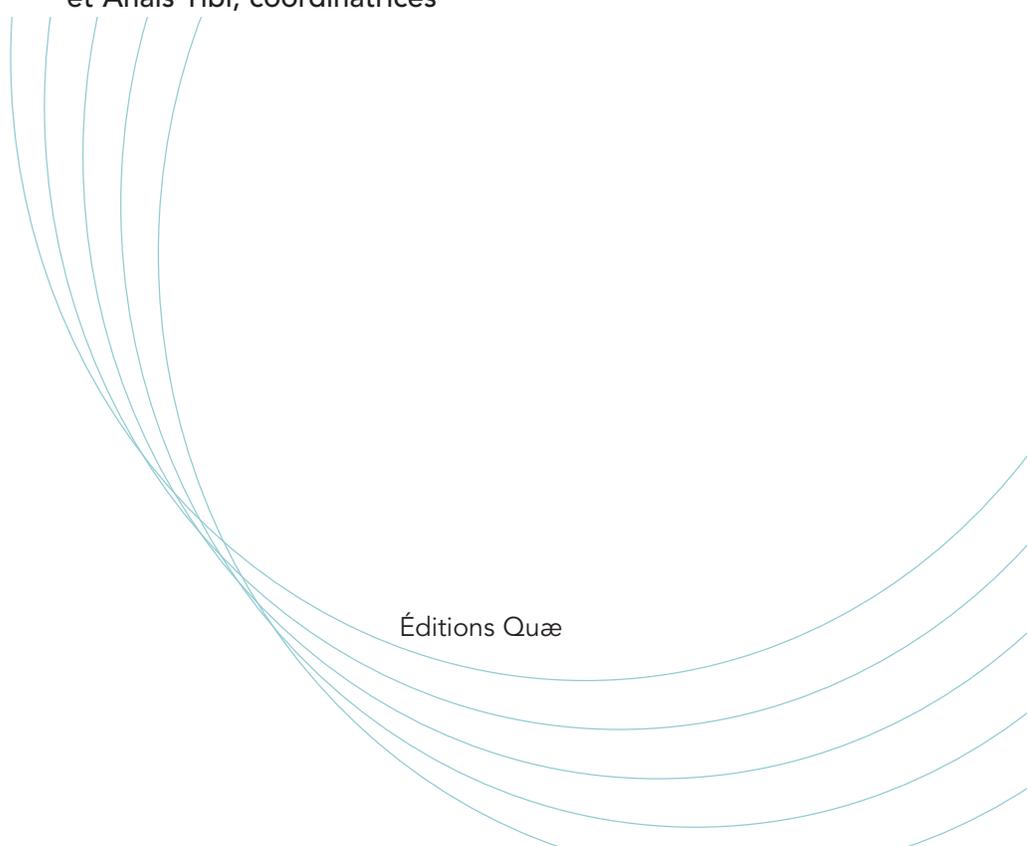


Recyclage de déchets organiques en agriculture

Effets agronomiques et environnementaux de leur épandage

Sabine Houot, Marie-Noëlle Pons, Marilys Pradel
et Anaïs Tibi, coordinatrices

Éditions Quæ



Collection Matière à débattre et décider

Émergence de maladies infectieuses
Risques et enjeux de société
Serge Morand, Muriel Figuié, coord.
2016, 136 p.

Agriculture et gaz à effet de serre
Dix actions pour réduire les émissions
Sylvain Pellerin, Laure Bamière, Lénaïc Pardon, coord.
2015, 200 p.

Comment réconcilier agriculture et littoral ?
Vers une agroécologie des territoires
Chantal Gascuel, Laurent Ruiz, Françoise Vertès, coord.
2015, 152 p.

La diversification des cultures
Lever les obstacles agronomiques et économiques
Jean-Marc Meynard, Antoine Messéan, coord.
2014, 106 p.

Réduire les pertes d'azote dans l'élevage
Expertise scientifique collective
2014, 168 p.

Les variétés végétales tolérantes aux herbicides
Un outil de désherbage durable ?
Expertise scientifique collective
2014, 160 p.

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex, France
www.quae.com

© Éditions Quæ, 2016

ISBN : 978-2-7592-2510-1

ISSN : 2115-1229

Le Code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Sommaire

Avant-propos	5
1. Disponibilité et usage des Mafor en France	
Les gisements et l'utilisation des Mafor en France	13
Le droit applicable aux Mafor	29
La perception des Mafor et les politiques locales de gestion de leur utilisation	36
Substituabilité aux engrais minéraux et déséquilibres régionaux	38
Conclusion	41
2. Intérêts agronomiques des Mafor et impacts environnementaux associés	
Les principaux mécanismes déterminant la valeur agronomique des Mafor	46
La valeur fertilisante des Mafor	50
La valeur amendante organique des Mafor	57
Impacts environnementaux associés à la valeur agronomique des Mafor	64
L'insertion des Mafor dans les systèmes de production des agriculteurs	71
Spécificités et difficultés du raisonnement de la fertilisation avec des Mafor	75
Conclusions	78
3. Les apports de contaminants <i>via</i> les Mafor	
Les contaminants biologiques	92
Les contaminants organiques (composés traces organiques)	109
Les contaminants minéraux (éléments traces minéraux)	123
Toxicité et effets sur la santé animale	143
Conclusions	147
4. Bilan des effets agronomiques et environnementaux de l'épandage de Mafor	
Bilan des résultats de l'ESCo par grands types de Mafor	156
Bilan des analyses du cycle de vie et des analyses coûts-bénéfices de l'épandage des Mafor	174
Besoins de recherches et d'études complémentaires	180

Annexe. Teneurs seuils et flux maximaux en contaminants chimiques dans la réglementation	187
Références bibliographiques	195
Auteurs et éditeurs de l'expertise	197

Avant-propos

Contexte de la demande d'expertise

SI LE RETOUR AU SOL DES DÉJECTIONS ANIMALES est une pratique agricole multiséculaire, ce mode de fertilisation organique a évolué à mesure des évolutions des systèmes et des conduites d'élevage. Au cours du xx^e siècle, il a surtout été complété, voire supplanté selon les systèmes de production et les régions, par le recours aux engrais minéraux en vue d'un apport maîtrisé des trois éléments fertilisants de base que sont l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K). Plus récemment, s'y sont ajoutées des matières fertilisantes d'origine résiduaire, provenant de diverses filières de traitement des effluents et déchets (eaux usées urbaines, ordures ménagères, effluents industriels...). Dans un contexte où se combinent volontés de réduction des volumes de déchets générés et de recyclage de ceux-ci, le renchérissement des coûts de l'énergie nécessaire à la fabrication des engrais azotés de synthèse, la raréfaction des ressources minières, notamment de phosphore, et la dégradation des taux de matière organique des sols renforcent l'intérêt du réemploi en agriculture de la partie organique de nos déchets.

L'Ademe a ainsi estimé à 355 millions de tonnes la quantité de déchets générés par les activités humaines (domestiques et industrielles) en France en 2009. L'agriculture et la sylviculture sont, de leur côté, responsables de la production de 374 millions de tonnes d'effluents d'élevage (fumiers, lisiers) et de résidus de culture, le plus souvent valorisés sur site. Ces quantités, stables depuis la dernière décennie, situent la France dans la moyenne des pays européens en termes de quantité de déchets générés par personne et par an. Le gisement de matières fertilisantes d'origine résiduaire, que nous appellerons ici Mafor, apparaît donc conséquent et en mesure de se substituer au moins en partie aux engrais minéraux.

Le recours à ces matières d'origines, et donc de natures, très diverses ne va cependant pas sans poser question. Tout d'abord, associant diversement les trois éléments de base N, P et K, elles sont moins souples d'utilisation que les engrais minéraux dont l'agriculteur connaît *a priori* la composition précise en éléments fertilisants. L'épandage de telles matières peut en outre faire l'objet de réticence, voire de rejet, de la part de leurs utilisateurs potentiels, notamment quand ceux-ci n'en sont pas directement producteurs, ou de la part des populations vivant à proximité. Plus préoccupants sont les impacts environnementaux que l'usage de ces Mafor peut engendrer. Ceux-ci sont de plusieurs types. L'épandage de Mafor peut se traduire par des fuites d'azote dans l'environnement constituant une source de pollution, phénomène en partie étudié dans le cadre de l'ESCO « Élevage et azote » pour ce qui concerne les effluents d'élevage des régions à

forte concentration de productions animales (Peyraud *et al.*, 2014). Compte tenu de la nature résiduaire des Mafor, elles sont également susceptibles d'apporter aux sols un ensemble de contaminants (pathogènes, organiques et minéraux) qui peuvent s'y accumuler et être transférés aux plantes qui s'y développent et aux animaux qui les ingèrent. La plupart de ces contaminants pouvant présenter un danger pour la santé humaine, les autorités publiques se doivent de rester vigilantes sur les risques de leur transfert à l'homme *via* les usages, agricoles ou forestiers, des Mafor. De ce point de vue, trois grandes filières aux enjeux différents peuvent être distinguées. Si toutes les Mafor sont susceptibles d'apporter au sol des contaminants chimiques, les matières issues des exploitations agricoles, principalement constituées d'effluents d'élevage, et les matières issues du traitement des eaux usées urbaines contiennent de la matière fécale. Elles sont donc susceptibles d'apporter au sol des micro-organismes pathogènes. Ce type d'apports ne concerne pas les déchets d'origine industrielle ou ménagère.

Questions posées à l'Inra, au CNRS et à Irstea

L'ÉPANDAGE DE MAFOR À DES FINS D'USAGES AGRICOLES OU FORESTIERS ne peut ainsi être envisagé que si elles améliorent la fertilité et les propriétés du sol, et si les risques qui y sont associés sont acceptables ou maîtrisables, aussi bien au niveau des parcelles ainsi amendées que de leur environnement (compartiments sol, eau et air, biodiversité) et des caractéristiques sanitaires des produits qui en sont issus. Face à la diversification des matières susceptibles d'être épandues sur les sols agricoles et forestiers et aux divers traitements que les matières brutes peuvent subir avant leur épandage (compostage, digestion lors de méthanisation, chaulage...), les questions posées par l'évaluation des bénéfices et des risques associés à l'utilisation de Mafor deviennent légitimes et les réponses que l'on peut y apporter sont nécessairement complexes. En conséquence, les autorités françaises souhaitent disposer d'éléments scientifiques les plus solides possibles permettant de maîtriser au mieux et de réguler, si nécessaire, la valorisation et l'utilisation de matières fertilisantes d'origine résiduaire.

En vue d'améliorer leurs connaissances sur les bénéfices agronomiques des Mafor et les impacts en termes de contaminations potentielles des écosystèmes induites par leur épandage, les ministères français en charge de l'Agriculture et de l'Écologie ont saisi fin 2012 l'Inra, le CNRS et Irstea pour réaliser une expertise scientifique collective (ESCo) (encadré p. 8) sur les effets de l'épandage de Mafor. L'objectif de cette analyse des connaissances scientifiques les plus à jour est, pour les autorités compétentes, de faire évoluer, le cas échéant, les critères sur lesquels fonder la mise à disposition de ces matières pour la fertilisation des sols agricoles et forestiers, ainsi que les règles encadrant leur épandage.

Le but de l'ESCo est donc de fournir aux pouvoirs publics, dans la mesure où la littérature scientifique le permet, un bilan des effets de l'épandage de Mafor sur les sols agricoles et forestiers, en envisageant ces effets, à court et à long termes, sur les plans agrono-

miques et environnementaux et en tenant compte des intérêts, des contraintes et des conséquences économiques et sociales de leur usage en agriculture. Les autres voies possibles de valorisation/élimination des matières d'origine résiduaire (incinération, mise en décharge...) n'ont pas fait l'objet d'une analyse bibliographique spécifique dans l'ESCO, mais elles doivent être présentes à l'esprit si l'on souhaite raisonner la valorisation agricole au regard des voies alternatives d'élimination des déchets.

L'application au sol de Mafor pose bien sûr la question des risques potentiels, notamment sanitaires, associés à cette voie de valorisation. La commande de l'ESCO n'incluait pas d'évaluation des risques sanitaires et se limite à un état des connaissances sur les différents types d'effets agronomiques et environnementaux identifiés. Les effets éventuels de l'application au sol des matières sur la santé humaine ne sont donc pas traités, étant donné l'ampleur des analyses nécessaires à l'évaluation de ces impacts et parce qu'ils ne sont pas au centre des compétences thématiques des trois instituts saisis. Une telle évaluation des risques pour la santé humaine, qui fait l'objet d'une saisine de l'Anses, a vocation à compléter les résultats obtenus ici et devrait être menée dans les suites de ce travail. Dans ce cadre, l'ESCO s'en tient donc à l'examen des teneurs en éléments indésirables dans les matières premières agricoles, aux effets écotoxicologiques sur la faune et la flore sauvages, et aux flux entre les compartiments des écosystèmes.

Définitions préliminaires et champ de l'ESCO

DANS LE CADRE DE L'EXPERTISE, L'ENSEMBLE DES MATIÈRES D'ORIGINE RÉSIDUAIRE susceptibles d'être épandues dans le but de fertiliser et/ou d'amender les sols ont été prises en compte, et ont été désignées pour plus de lisibilité sous l'acronyme Mafor.

Cet acronyme recouvre une large diversité de matières, notamment :

- les effluents d'élevage (bruts ou traités) ;
- les boues issues du traitement des eaux usées urbaines ou domestiques ;
- les matières, eaux et boues d'épuration issues des industries agroalimentaires, papetière, pétrolière, textile, chimique... ;
- les boues issues des opérations de potabilisation de l'eau ;
- les composts de déchets verts, de déchets ménagers, de déchets organiques issus des activités industrielles (biodéchets) ;
- les digestats de méthanisation (compostés ou non) ;
- les cendres, en particulier issues des installations de combustion de biomasse à vocation énergétique ;
- les sédiments dragués en milieu fluvial ;
- les matières issues de la pyrolyse de certains déchets (biochars).

Cette liste très large ne présume en rien de la capacité de la littérature scientifique existante à renseigner toutes les questions posées à l'ESCO pour chaque matière.

L'ESCo, principes et méthodes.

La présente ESCo a été réalisée conjointement par l'Inra, le CNRS et Irstea, en adoptant les principes et la méthode retenus par la Délégation à l'expertise collective, à la prospective et aux études (Depe) de l'Inra.

L'expertise scientifique en appui aux politiques publiques

La mission d'expertise en appui aux politiques publiques de la recherche publique a été réaffirmée par la Loi d'orientation de la recherche (2006), ainsi que par la Loi ESR (2013). L'apport d'argumentaires scientifiques à l'appui de positions politiques devient en effet une nécessité dans les négociations internationales. Or, les connaissances scientifiques sont de plus en plus nombreuses, dispersées et produites dans des domaines très variés, difficilement accessibles en l'état aux décideurs. L'activité d'ESCo développée depuis 2002 à l'Inra se définit comme une activité d'analyse et d'assemblage de connaissances produites dans des champs très divers du savoir et pertinentes pour éclairer l'action publique. Elle vise à mettre en évidence les acquis scientifiques, les points d'incertitudes, les lacunes et les éventuelles questions faisant l'objet de controverses scientifiques.

La charte de l'expertise scientifique à l'Inra

Cette activité est encadrée par une charte qui énonce des principes d'exercice, dont le respect garantit la robustesse des argumentaires produits. Cette charte fonde l'exercice sur quatre principes : la compétence, la pluralité, l'impartialité et la transparence.

- La compétence se décline d'abord au niveau des institutions prenant en charge l'expertise qui ne traitent des questions d'expertise que dans leurs domaines de compétences. Ce principe de compétences s'applique aux experts qui sont qualifiés sur la base de leurs publications scientifiques et également à la conduite des expertises dans le respect de la qualité du processus.
- La pluralité s'entend comme une approche pluridisciplinaire des questions posées qui associe les différentes sciences de la vie et les sciences économiques et sociales pour une mise en perspective des connaissances. La pluralité se manifeste également dans la diversité des origines institutionnelles des experts. La pluralité des domaines de recherche et des points de vue disciplinaires vise à stimuler le débat et contribue à favoriser l'expression de la controverse et de l'exercice critique.
- Le principe d'impartialité est garanti par une déclaration d'intérêts remplie par chaque expert, qui permet de faire état de leurs liens éventuels avec des acteurs socio-économiques, ainsi que par la pluralité du collectif d'experts.
- Enfin, le respect de la transparence se traduit par la production de documents d'analyse et de synthèse mis à disposition de tous.

L'ESCo est une activité d'expertise institutionnelle, régie par la charte nationale de l'expertise à laquelle le CNRS, l'Inra et Irstea ont adhéré en 2011.

Définition et fonctionnement de l'ESCO

L'ESCO établit un état des lieux des connaissances scientifiques académiques dont sont extraits et assemblés les éléments répondant aux questions posées par les commanditaires. Les questions adressées à l'Inra, au CNRS et à Irstea sont énoncées dans un cahier des charges (annexe 1) qui est le résultat d'une itération entre les commanditaires et le groupe d'experts fixant les contours et le contenu du champ de l'expertise. Un comité de suivi, réuni à l'initiative des commanditaires, sert d'interface entre les experts et les commanditaires et veille au bon déroulement des travaux.

Les experts rédigent chacun une contribution faisant état des références bibliographiques utilisées. L'ensemble des contributions forme le rapport d'expertise qui est mis en ligne par les organismes de recherche en charge de la réponse (Inra, CNRS et Irstea). Les experts scientifiques sont responsables du rapport et des conclusions de l'ESCO.

L'Inra et sa Depe s'engagent sur les conditions dans lesquelles se déroule le processus d'expertise : qualité du travail documentaire de mise à jour des sources bibliographiques, transparence des discussions entre les experts, animation du groupe de travail et rédaction des documents de synthèse et de communication sous une forme qui concilie rigueur scientifique et lisibilité par un public large.

À ce jour, neuf ESCo ont été conduites par l'Inra : « Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? », « Pesticides, agriculture, environnement », « Sécheresse et agriculture », « Consommation des fruits et légumes », « Agriculture et biodiversité », « Douleurs animales », « Comportements alimentaires », « Variétés végétales tolérantes aux herbicides » et « Flux d'azote en élevage »*.

* Les différentes ESCo sont consultables sur le site de l'Inra à l'adresse suivante : [http://institut.inra.fr/liste/actualites/1513/\(iLimit\)/5/\(iLimit\)/5](http://institut.inra.fr/liste/actualites/1513/(iLimit)/5/(iLimit)/5)

Dans le cas particulier des effluents d'élevage (déjections des animaux éventuellement mélangées à de la litière), les déjections directement émises au champ par les animaux, non récupérables (environ 50 % de la totalité des effluents), ne sont pas considérées comme des Mafor car elles ne sont pas épandues au sens strict (c'est-à-dire par l'homme). Ces apports non maîtrisés de déjections constituent néanmoins un élément contextuel à prendre en compte dans toute réflexion globale sur la gestion des Mafor dans les pratiques de fertilisation des sols agricoles, et sur l'encadrement des pratiques d'épandage : au même titre que les déjections récupérables, ils sont susceptibles d'apporter des éléments fertilisants et de la matière organique, mais également d'être vecteurs de contaminants. L'analyse bibliographique réalisée dans l'ESCO est centrée sur les situations d'épandage sur des sols agricoles (incluant les prairies) et forestiers (forêts, plantations, taillis). L'utilisation de Mafor chez les particuliers, dans les espaces verts des collectivités et sur les sols en cours de revégétalisation ou de restauration n'a pas été incluse dans le périmètre du travail. L'utilisation de Mafor comme fertilisants des plans d'eaux qui accueillent

des élevages de poissons et les pratiques d'irrigation utilisant des eaux usées traitées ne sont pas non plus dans le périmètre de l'ESCo.

Les effets de l'épandage de Mafor peuvent *a priori* être modulés et conditionnés directement ou indirectement par divers facteurs potentiellement déterminants pour l'évaluation de leur application au sol :

- la nature des matières premières en amont des procédés de traitement et des Mafor ;
- les procédés de traitement permettant d'obtenir des Mafor (traitement des déchets ménagers, traitement des effluents d'élevage, traitement de l'eau et des boues issues du traitement des eaux...) ;
- les pratiques d'application au sol (mode, qualité et fréquence de l'épandage) ;
- les caractéristiques pédoclimatiques de la parcelle et plus généralement du milieu récepteur (depuis la parcelle où a lieu l'épandage jusqu'au bassin versant) ;
- le contexte socio-économique local (exploitation, collectivité, pays, mais également éventuels cahiers des charges définis par des filières) ;
- le type de système de culture (espèces cultivées, façons culturales...).

Les engrais minéraux n'ont pas fait l'objet de recherches bibliographiques exhaustives visant à caractériser leurs impacts agronomiques, environnementaux et socio-économiques, mais ils sont considérés en tant que point de comparaison dans la mesure où certaines des matières objet de l'ESCo peuvent venir en substitution à certains engrais minéraux.

Méthodes et portée de l'ESCo

L'ESCo SE FONDE SUR LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE CERTIFIÉE, ce qui explique que certains phénomènes, en particulier récents, ne puissent être renseignés, soit parce que les recherches disponibles ont été conduites dans des contextes trop éloignés des conditions observées en France, soit faute de travaux publiés dans les revues référencées dans les bases de données bibliographiques internationales (Web of Science pour l'essentiel). Ainsi, les Mafor utilisées de façon très anecdotique (par exemple les cendres, les biochars, les sédiments de dragage) sont très peu renseignées.

Une trentaine d'experts français et étrangers d'origines institutionnelles diverses (Inra, Irstea, CNRS, universités françaises et étrangères) ont été mobilisés pour l'ESCo. Leurs compétences relèvent de l'agronomie, de l'écotoxicologie, de la chimie, de l'économie, de la sociologie, du droit... Le rapport d'expertise est étayé par un corpus bibliographique d'environ 3 300 références, constitué par deux professionnelles de l'information scientifique et technique (Inra et Irstea) et par l'équipe projet Inra. Ce corpus est essentiellement composé d'articles scientifiques auxquels se sont ajoutés des données statistiques, ouvrages et rapports techniques. Les experts en ont extrait, analysé et assemblé les éléments pertinents pour éclairer les questions posées.

L'ESCo ne fournit pas d'avis, ni de recommandations, ni de réponses pratiques aux questions qui se posent aux gestionnaires. Elle réalise un état des connaissances scien-

tifiques le plus complet possible des impacts liés à l'épandage de Mafor en agriculture et en forêt, à travers une approche pluridisciplinaire associant sciences du vivant et sciences économiques et sociales. Elle identifie également les problématiques peu renseignées et pour lesquelles les besoins de recherche semblent prioritaires.

Présentation des chapitres

L'OUVRAGE QUI SUIT EST STRUCTURÉ EN QUATRE CHAPITRES. Dans un premier temps, sont examinés, dans le contexte français actuel, les modes d'usage des Mafor en agriculture et en forêt, les quantités disponibles et la provenance de ces différentes Mafor, ainsi que les règles régissant leur usage. On analyse ensuite plus spécifiquement les effets agronomiques (fertilisants et amendants) du recours aux Mafor, puis la nature et les devenir possibles des contaminants qu'elles contiennent. Enfin, un dernier chapitre propose une synthèse des recherches tentant d'établir la balance entre les effets positifs et les risques associés, ainsi qu'un premier bilan, plus qualitatif, des impacts positifs et négatifs des différentes Mafor utilisées en France, bilan que les experts tirent de la littérature scientifique spécifique.

Cet ouvrage ne mentionne pas les références bibliographiques mobilisées, qui figurent dans le rapport d'ESCO.

1. Disponibilité et usage des Mafor en France

Les gisements et l'utilisation des Mafor en France

LES DONNÉES RELATIVES AUX GISEMENTS DE MATIÈRES RÉSIDUAIRES, à la part de ces gisements valorisable en agriculture et aux pratiques d'épandage sont très difficiles à rassembler pour toutes les Mafor objet de l'ESCO : ces données sont collectées de différentes manières, ne sont pas centralisées et sont incomplètement informatisées. De plus, elles ne sont pas toutes facilement comparables car exprimées dans différentes unités de mesures (matière brute *versus* matière sèche). Enfin, certains gisements ne sont renseignés au niveau national que par des enquêtes réalisées il y a plus de dix ans et qui n'ont pas été actualisées depuis. Des données plus récentes existent mais ne sont disponibles que pour certaines régions ou ne se basent pas sur la même typologie des matières, rendant difficile l'articulation entre les données et l'estimation de l'évolution des gisements au cours du temps. Pour ces raisons, il est difficile de fournir une vision globale et précise des flux de Mafor actuellement épandues en France.

I Matières actuellement valorisées par l'épandage agricole et enjeux associés

Les matières d'origine résiduaire susceptibles d'être épandues sur les sols agricoles et forestiers sont issues des activités agricoles, urbaines et industrielles. Classiquement jusqu'à présent, ce mode de valorisation était appelé « valorisation organique » car il concernait exclusivement des matières de nature organique. Désormais, des matières inorganiques (notamment les cendres issues de la combustion de biomasse bois) sont également concernées par cette voie de valorisation car elles présentent un intérêt agronomique (chapitre 2).

Ces matières peuvent être épandues directement sur les sols, sans traitement préalable. Elles peuvent également subir un traitement avant épandage qui peut avoir différents objectifs : hygiénisation par compostage ou chaulage, réduction des volumes par déshydratation selon différents procédés, production d'énergie par digestion anaérobie, etc. (encadré p. 16-17).

La valorisation agronomique par épandage sur les sols agricoles peut constituer une filière de gestion des déchets à part entière (cas du compostage) ou être incluse dans une filière de gestion des déchets (cas de la valorisation énergétique des déchets *via* la

méthanisation). Il existe par ailleurs d'autres voies potentielles de gestion de ces matières : le recyclage des matériaux qui deviennent alors matière première d'un nouveau produit (« valorisation matière », du verre par exemple), la mise en décharge et l'incinération sans récupération d'énergie. Les voies de traitement sans valorisation tendent à disparaître, notamment sous l'effet des incitations publiques tant françaises qu'européennes. En fonction des matières, les filières privilégiées de traitement ne sont pas les mêmes. On ne s'intéresse ici qu'aux filières incluant une valorisation agronomique de matières ayant subi ou non un traitement.

Les informations présentées dans cette section concernent les principaux gisements français de matières d'origine agricole, urbaine et industrielle, essentiellement de nature organique, qui font actuellement l'objet d'une valorisation organique en France, d'après l'enquête « Pratiques culturelles 2011 » conduite par le service de la statistique et de la prospective (SSP) du ministère de l'Agriculture. Les autres voies de valorisation/élimination de ces matières sont mentionnées mais n'ont pas été étudiées dans le cadre de cette ESCo. La figure 1.4 représente les flux d'apport de Mafor d'origine agricole d'une part, et urbaine et industrielle d'autre part, sur les sols agricoles en France. Les flux de matières précisés constituent des ordres de grandeur, exprimés en millions de tonnes (Mt) de matière sèche (MS) ou de matière brute (MB) en fonction des données disponibles, et estimés d'après des données qui n'ont pas toutes été collectées la même année¹.

Les Mafor d'origine agricole

Les effluents d'élevage récupérables (déjections émises en bâtiment et non dans les pâtures, soit environ 50 % de la totalité des effluents d'élevage) représentent à la fois le gisement et les quantités épandues sur les sols agricoles les plus importants. La quasi-totalité de ces effluents récupérables est épandue sur sols agricoles, en grande majorité sans traitement préalable. D'après l'enquête « Pratiques culturelles 2011 »², de l'ordre de 109 Mt MB d'effluents bruts ont été épandues en 2012 (dont 87,3 Mt d'effluents bovins), ainsi qu'environ 4,2 Mt MB de composts d'effluents d'élevage. En 2013, moins de 1 % des effluents d'élevage ont été valorisés énergétiquement par méthanisation, les digestats (environ 1,1 Mt MB en 2014) étant ensuite épandus sur les sols agricoles. La figure 1.1 présente la répartition géographique des effluents d'élevage récupérables en 2000-2001 en France (les données régionalisées compilées par Biomasse Normandie 2002 n'ont pas été actualisées depuis).

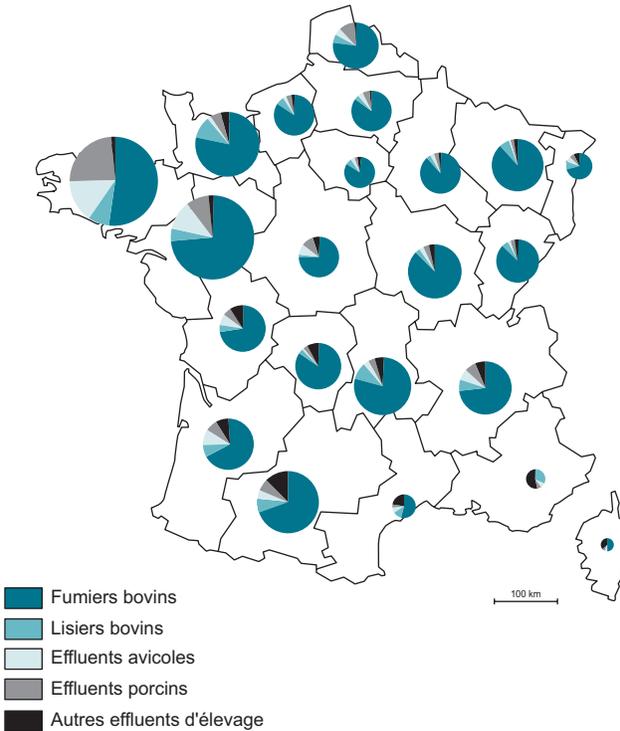
Les Mafor d'origines industrielle et urbaine

Les effluents et les déchets organiques industriels : en 2008, de l'ordre de 1,8 Mt MS ont été épandues sur les sols agricoles, et 0,3 Mt MS envoyées en compostage ou méthanisa-

1. Le détail des sources de données exploitées pour réaliser ces estimations figure dans le chapitre 1 du rapport d'ESCo.

2. Agreste – Service de la statistique et de la prospective du ministère chargé de l'Agriculture.

Figure 1.1. Répartition géographique de la production d'effluents d'élevage récupérables en France en 2000-2001.



La taille des camemberts est proportionnelle à la quantité de déjections récupérables. Par exemple, environ 4,9 Mt de matière sèche ont été produites en Bretagne, et environ 53 500 tonnes en Corse. Sources : données Biomasse Normandie, 2002.

tion. Il s'agissait majoritairement de boues et d'effluents provenant des industries agro-alimentaires (notamment des secteurs fruits et légumes, lait, viandes et betterave sucrière) et de l'industrie papetière. La figure 1.2 illustre la répartition spatiale de ces 2,1 Mt MS. Les boues des stations de traitement des eaux usées (Steu) urbaines : aujourd'hui 42 % de la production annuelle de ces boues urbaines sont épandues sur sols agricoles sans compostage préalable (soit environ 0,4 Mt MS en 2011) et 31 % après compostage (soit 0,3 Mt MS) – 18 % sont incinérés et 9 % mis en décharge. Un état des lieux de la filière méthanisation, réalisé en 2014 par l'association d'animation et de développement rural Solagro, estime que 65 à 70 unités de méthanisation dédiées traitent annuellement

Les principales voies de traitement applicables aux matières d'origine résiduaire.

Traitements biologiques

Le compostage dégrade et transforme des substrats riches en matière organique (MO) en une matière organique stabilisée (plus résistante à la biodégradation) plus homogène : le compost. Cette transformation en conditions aérobies entraîne la perte de MO et d'eau. Le procédé comprend une première phase thermophile (50-70 °C) qui amène les substrats à l'état de compost frais, puis une phase de maturation au cours de laquelle la température diminue (35-45 °C), qui le transforme en compost mûr riche en humus stable. La maîtrise de la phase de dégradation et la durée de la phase de maturation conditionnent le bon déroulement du compostage et le degré de stabilité de la MO en fin de processus.

Le compostage concerne essentiellement les déchets verts des collectivités et des particuliers, la fraction fermentescible des ordures ménagères (compostée en mélange avec des déchets verts) et les boues d'épuration urbaines déshydratées (compostées avec des déchets verts ou des écorces permettant la structuration des matières traitées).

Enfin actuellement, le compostage est un post-traitement obligatoire pour que les digestats de méthanisation soient considérés comme des amendements organiques (normes NFU 44-051 et NFU 44-095).

La digestion anaérobie ou méthanisation est une méthode de valorisation énergétique de matrices organiques au cours de laquelle la dégradation en conditions anaérobies des MO génère la production de biogaz (méthane et dioxyde de carbone). Le procédé peut se faire par voie liquide ou sèche, à différentes températures. On distingue ainsi la méthanisation mésophile (à 30-40 °C, la plus classiquement utilisée actuellement en France) et la méthanisation thermophile (à 45-60 °C). Le résidu du procédé, appelé digestat, est une matière plus ou moins humide et qui contient de la MO plus ou moins stabilisée. Le digestat peut être épandu directement ou, plus fréquemment, après différents post-traitements (séparation de phase et/ou compostage par exemple). Les déjections animales sont en général traitées en co-digestion avec des effluents agro-industriels, des pailles ou des résidus de cultures... Les boues d'épuration urbaines sont souvent digérées seules. La digestion des déchets solides (déchets ménagers, industriels) nécessite leur broyage et l'adjonction d'eau.

La nitrification-dénitrification vise à éliminer une partie de l'azote contenu dans les effluents vers l'atmosphère sous une forme non polluante (N_2), par une alternance de phases aérobies et anoxiques permettant une nitrification-dénitrification. Elle est notamment pratiquée dans les zones où la production d'effluents d'élevage excède les capacités d'épandage sur les cultures.

Traitements physiques et physico-chimiques

Les grosses stations de traitement des eaux usées (Steu) urbaines, qui génèrent la majorité des tonnages de boues, effectuent toujours un traitement physique et/ou chimique des boues afin d'obtenir des matières plus faciles à manipuler car de

volume moindre et plus stables face au processus de biodégradation. Seules les petites Steu, essentiellement rurales, produisent des boues liquides conservées dans des silos (comme les lisiers) avec un dispositif d'homogénéisation.

L'épaississement consiste à ajouter un flocculant pour obtenir des boues pâteuses dont le taux de matière sèche (siccité) est d'environ 7 %. La déshydratation (par filtrage, centrifugation...) permet de passer à une siccité de 20-25 %. Le séchage, qui s'applique à des boues déjà déshydratées, ayant subi ou non un traitement biologique par digestion, vise à réduire encore le taux d'humidité de la matière pour en faciliter le transport. Le séchage solaire permet d'atteindre une siccité de 70 à 80 % par évaporation naturelle ou semi-naturelle (apport énergétique complémentaire) de l'eau. Par séchage thermique, on atteint des siccités de 95 % et les boues se présentent sous forme de poudre ou de granulés.

Le chaulage, essentiellement pratiqué sur les boues déshydratées, consiste à ajouter de la chaux dans le but d'augmenter le pH (> 11) pour bloquer le processus de fermentation, et ainsi stabiliser la matière. Environ 30 % des boues sont chaulées en France, essentiellement dans les stations d'épuration de grande capacité.

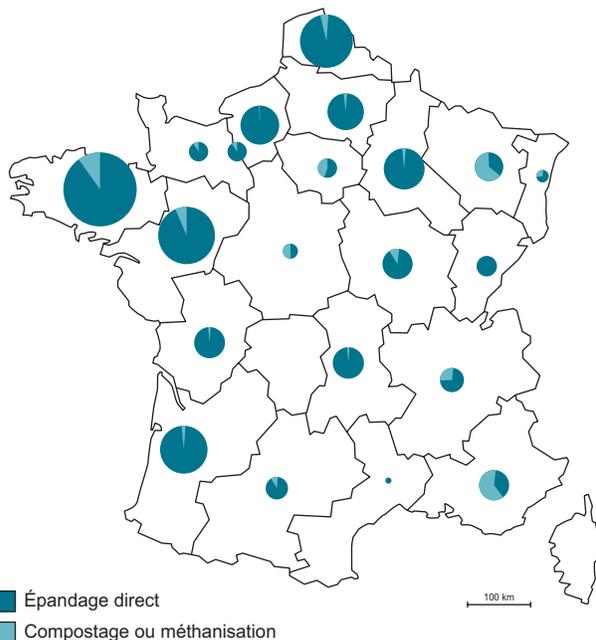
La séparation de phase est appliquée aux matières liquides ayant subi ou non un traitement biologique au préalable (lisiers, digestats liquides, boues...). Elle permet l'obtention, par différentes techniques, de deux phases : une phase solide qui concentre la majeure partie de la matière organique particulaire et les éléments insolubles comme la majeure partie du phosphore, les éléments traces, et une phase liquide qui contient la majeure partie des éléments solubles, dont l'azote sous forme minérale et la potasse. Cette opération permet la gestion distincte des deux phases, et favorise l'exportation du phosphore récupéré dans la phase solide hors des zones d'excédent structurel dans le cas des lisiers, permettant ainsi de réduire la pression d'épandage.

Les effluents d'élevage tels que les fientes de volailles ou les lisiers peuvent subir, comme les boues d'épuration, un séchage qui, en diminuant fortement la teneur en eau, permet le transport et la commercialisation des effluents sous forme d'engrais organique. À noter qu'au cours du séchage, la majeure partie de l'azote ammoniacal est perdue par volatilisation.

La notion d'hygiénisation

Selon l'arrêté du 8 janvier 1998 sur l'épandage des boues d'épuration, l'hygiénisation est un « traitement qui réduit à un niveau non détectable les agents pathogènes présents dans la boue ». La boue est ainsi hygiénisée si elle présente des concentrations en certains pathogènes indicateurs de traitement inférieures à des seuils fixés. L'hygiénisation est également définie dans la norme NFU 44-051 comme l'« effet induit par les traitements subis par des matières premières potentiellement porteuses d'agents pathogènes humains, animaux ou végétaux, et qui se traduit par une baisse à des niveaux acceptables de ces agents pathogènes ». Dans la pratique, l'hygiénisation est obtenue par des procédés incluant une élévation de la température sur un temps suffisamment long (compostage, méthanisation thermophile, séchage solaire ou thermique) ou par une augmentation du pH (chaulage).

Figure 1.2. Répartition géographique des quantités de déchets et d'effluents industriels destinées à la valorisation agricole en 2008.



La taille des camemberts est proportionnelle à la quantité de déchets et effluents. Par exemple, environ 385 000 t de matière sèche en Bretagne et environ 1 500 t en Languedoc-Roussillon.
Source : Insee-Agreste-SSP, 2008.

360 000 tonnes de matière sèche de boues de Steu et produisent 600 000 tonnes de digestats bruts. Une partie (impossible à quantifier) de ces boues digérées est ensuite compostée. La figure 1.3 illustre la répartition spatiale des quantités de boues destinées à la valorisation agricole en 2011 pour les filières de production de boues de Steu activées et à biofiltres³ (les plus largement représentées en France en termes de nombres d'habitants desservis ou de débits d'eaux usées traitées).

3. La plupart des eaux usées subissent un traitement biologique aérobie visant à dégrader leurs MO ; les bactéries soit se développent librement dans le bassin (procédé dit à « boues activées »), soit sont fixées sur un matériau à travers lequel l'eau percole (procédé dit « à biofiltres »).