Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier

Sabine Houot, Marie-Noelle Pons, Marilys Pradel, Marc Antoine Caillaud, Isabelle Savini, Anaïs Tibi

▶ **To cite this version:**

Sabine Houot, Marie-Noelle Pons, Marilys Pradel, Marc Antoine Caillaud, Isabelle Savini, et al.. Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier : Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Résumé de l'expertise scientifique collective. [0] Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE). 2014, 8 p. hal-02801920

HAL Id: hal-02801920
https://hal.inrae.fr/hal-02801920

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

VALORISATION DES MATIÈRES FERTILISANTES D'ORIGINE RÉSIDUAIRE SUR LES SOLS À USAGE AGRICOLE OU FORESTIER

IMPACTS AGRONOMIQUES, ENVIRONNEMENTAUX, SOCIO-ECONOMIQUES

RESUMÉ DE L'EXPERTISE SCIENTIFIQUE COLLECTIVE - JUILLET 2014

INRA SCIENCE & IMPACT

Membre fondateur de agreenium

cnrs

irstea

La fertilisation organique des cultures et des prairies est une pratique multiséculaire traditionnellement basée sur l'épandage des déjections animales. Au cours du XX^{e} siècle, les engrais minéraux sont venus compléter voire supplanter la fertilisation organique, en permettant une gestion plus aisée des principaux éléments fertilisants (l'azote N, le phosphore P et le potassium K). Plus récent, l'emploi en agriculture de matières provenant de diverses filières de traitement des déchets domestiques et industriels (eaux usées, ordures ménagères, effluents industriels…) répond à des enjeux forts tels que l'amélioration du recyclage des déchets, le renchérissement des coûts de l'énergie nécessaire à la fabrication des engrais minéraux de synthèse, la raréfaction des ressources minières (notamment de P) et la dégradation des taux de matière organique des sols.
L'ADEME a estimé à 355 millions de tonnes la quantité de déchets issus des activités domestiques et industrielles en France en 2009. La même année, l'agriculture et la sylviculture ont généré, de leur côté, 374 millions de tonnes d'effluents d'élevage (fumiers, lisiers) et de résidus végétaux essentiellement valorisés sur place. Cette conséquente ressource en matières fertilisantes d'origine résiduaire (désignées par "Mafor") contenant des éléments nutritifs est en mesure de se substituer au moins en partie aux engrais minéraux de synthèse.

L'épandage de Mafor sur sols agricoles ou forestiers pour améliorer la fertilité et les propriétés du sol ne peut être envisagé que si les risques associés sont acceptables pour l'environnement et l'Homme. Afin de maîtriser au mieux et de réguler, si nécessaire, l'utilisation de ces matières, les ministères français en charge de l'agriculture et de l'écologie ont demandé à l'Inra, au CNRS et à Irstea de réaliser une expertise scientifique collective (ESCo) sur les bénéfices agronomiques des Mafor et les impacts de leur épandage en termes de contaminations potentielles des écosystèmes, en tenant compte des intérêts, contraintes et conséquences économiques et sociales de cette pratique. Cette analyse des connaissances scientifiques pourrait contribuer à faire évoluer les critères sur lesquels fonder la mise à disposition de ces matières aux utilisateurs finaux, ainsi que les règles encadrant leur épandage.
L'évaluation des risques sanitaires potentiels associés à l'épandage de Mafor, exclue de la commande d'ESCo, fait l'objet d'une saisine de l'Anses et devrait être menée en prolongement de ce travail.

1. Utilisation actuelle des Mafor en France et enjeux socio-économiques associés

Les filières génératrices de matières résiduaires valorisables en épandage agricole se répartissent en quatre principaux types : l'élevage, l'épuration des eaux usées urbaines, les déchets ménagers et urbains, et l'industrie. Les Mafor issues de ces filières recouvrent une large diversité de matières et peuvent être épandues en l'état ou après divers traitements biologiques, physiques ou physico-chimiques qu'elles subissent souvent en mélange avec d'autres matières (Tableau 1). D'autres matières sont susceptibles d'être épandues, telles que les cendres de biomasse bois et les sédiments dragués en milieu fluvial.

Tableau 1. Principales voies de traitement applicables aux Mafor prédominantes

Mafor / *Traitement*	effluents d'élevage	boues d'épuration urbaines	déchets urbains			effluents industriels
			ordures ménagères résiduelles	biodéchets triés à la source	déchets verts	
sans traitement	seuls	seules				seuls
compostage → *compost*	seuls ou en mélange	en mélange	seules	en mélange	seuls ou en mélange	seuls ou en mélange
digestion anaérobie (méthanisation) → *digestat*	seuls ou en mélange	seules	seules	seuls ou en mélange	en mélange	seuls ou en mélange
chaulage		oui	oui			

1.1. Une répartition hétérogène des ressources en Mafor

L'état des lieux des quantités de Mafor disponibles en France est très difficile à réaliser. Les données sont abondantes mais difficiles à collecter et à mettre en cohérence car les recensements n'utilisent pas les mêmes dénominations de matières et ne les quantifient pas dans les mêmes unités (matière brute ou sèche).

Les **effluents d'élevage** en constituent le premier poste avec 274 millions de tonnes (Mt) brutes en 2012. Environ 50% des déjections sont émises directement à la pâture. Les 50% récupérables sont principalement des fumiers et lisiers de bovins, et des lisiers de porcins, épandus en quasi-totalité sans traitement préalable.
Les quantités épandues de Mafor d'origines urbaine et industrielle sont plus difficiles à estimer : environ 0,7 Mt sèches de **boues d'épuration urbaines**, 2,2 Mt brutes de **composts et digestats issus de déchets urbains** et 1,8 Mt sèches d'**effluents industriels**.

Les quantités disponibles de Mafor sont globalement stables et le potentiel d'accroissement de la part valorisable sur sols agricoles est faible. Une amélioration de la collecte des biodéchets (ménagers, industriels et gros producteurs de type cantines ou grandes surfaces commerciales) triplerait les quantités de composts et de digestats urbains, mais cette augmentation aurait peu d'impact sur la quantité totale de Mafor disponibles essentiellement constituées d'effluents d'élevage.
Le développement de la méthanisation pourrait augmenter la diversité des Mafor sans pour autant accroître les quantités disponibles : la co-digestion d'effluents d'élevage et de déchets divers (en fonction des activités industrielles locales) conduit par exemple à augmenter les volumes de digestats au détriment des effluents d'élevage non traités.

La répartition nationale des quantités de Mafor disponibles est hétérogène. La concentration de ces ressources sur certains territoires d'élevage ou périurbains se traduit par l'existence de zones en surcapacité au regard notamment des apports maximum en azote contenu dans les effluents d'élevage définis par la directive européenne 91/676/CEE dite "Nitrates". Le développement des contraintes réglementaires concernant le phosphore devrait ajouter un niveau de complexité supplémentaire pour l'optimisation de la gestion des Mafor à l'échelle nationale.

1.2. L'épandage de Mafor a concerné 6,6 millions d'hectares de grandes cultures et prairies en 2011

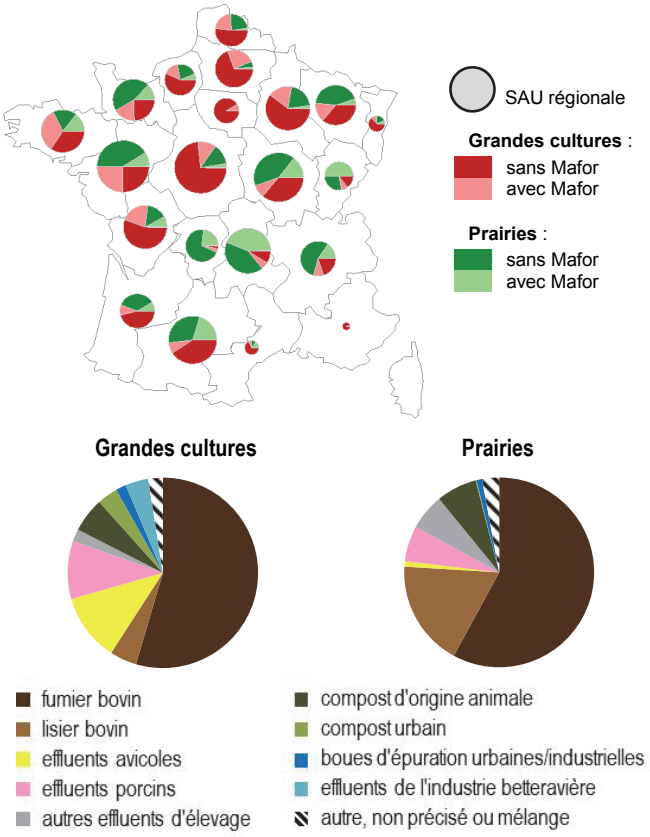
Les épandages de Mafor concernent la quasi-totalité des régions mais de façon très inégale selon les régions (Fig. 2). Au total, plus de 25% des surfaces de grandes cultures (notamment maïs, blé tendre et colza) et près de 30% des surfaces de prairies ont reçu un épandage de Mafor en 2011. Cette année-là, 94% des Mafor épandues étaient, en quantité, des effluents d'élevage. Les 6% restants étaient des effluents de l'industrie betteravière, des composts urbains et des boues d'épuration urbaines ou industrielles.

L'épandage des cendres et des sédiments n'est pas documenté dans la littérature scientifique du fait de la faiblesse des volumes actuellement concernés. Les biochars, résidus de la pyrolyse à vocation énergétique, sont encore très peu utilisés en tant que Mafor.

Le recours aux différentes Mafor ne répond pas aux mêmes enjeux et ne suit pas les mêmes logiques :
- l'épandage des effluents d'élevage relève d'une **pratique ancienne**. Leur élimination est rarement envisagée, sauf dans les zones en excédent structurel au titre de la directive "Nitrates" ;

- l'épandage de certaines Mafor provenant des industries agro-alimentaires entre parfaitement dans la logique de **bouclage des cycles.** C'est le cas, par exemple, des effluents de l'industrie sucrière épandus sur les parcelles dédiées à la culture de betteraves. Dans cette logique, certaines de ces Mafor sont commercialisés en tant qu'engrais organiques (les vinasses de betterave, par exemple).
- l'épandage de Mafor d'origine urbaine (boues d'épuration, composts urbains) est plutôt perçu comme un service rendu par l'agriculture à la société, en la débarrassant de ses déchets. Le développement des procédés de traitement des déchets urbains (notamment la méthanisation) et l'usage des "nouvelles" Mafor qui en sont issues sont cependant très peu étudiés en termes de perception sociale.

Figure 2. Répartition géographique et typologique des épandages de Mafor organiques en France en 2011



Données : Agreste, enquête "Pratiques culturales" 2011.

1.3. Conditions juridiques, économiques et sociales de la substitution des engrais minéraux par des Mafor

Plus de 95% des quantités de Mafor épandues ont un statut juridique de "sous-produit" (effluents d'élevage) ou de "déchet" (boues d'épuration, déchets et effluents industriels, la grande majorité des digestats, cendres, sédiments…). Environ 5 millions de tonnes de matières brutes sont par ailleurs épandues en tant que "produits" homologués ou normalisés. Lorsque des prix sont associés aux Mafor, ils sont souvent faibles par rapport à ceux des engrais minéraux, ce qui pourrait favoriser le recours aux Mafor dans un contexte de hausse du prix des engrais minéraux de synthèse.

Rééquilibrer la répartition des activités génératrices de Mafor pour mieux adapter l'offre à la demande locale est un enjeu fort. L'ESCo "Elevage et azote"[1] a souligné l'absence de travaux sur la faisabilité d'options telles que la relocalisation partielle des productions animales, et la nécessité de raisonner cette relocalisation au cas par cas, en la couplant avec des travaux sur la perception de ces transferts d'effluents dans les territoires d'accueil.

[1] INRA (2012). *Les flux d'azote liés aux élevages. Réduire les pertes, rétablir les équilibres.* Synthèse du rapport d'expertise scientifique collective, 68p.

Il existe par ailleurs peu de travaux économiques faisant un bilan coûts/bénéfices du **traitement des Mafor dans l'optique de faciliter leur transport** et rééquilibrer les épandages à l'échelle nationale. Bien qu'il ouvre la voie à la commercialisation et au transfert de la matière ainsi transformée, ce traitement pèse lourd dans les coûts. Sa mise en œuvre résulte donc d'un arbitrage pour le producteur de Mafor.

2. Les Mafor ont une valeur agronomique intéressante mais variable selon leur origine

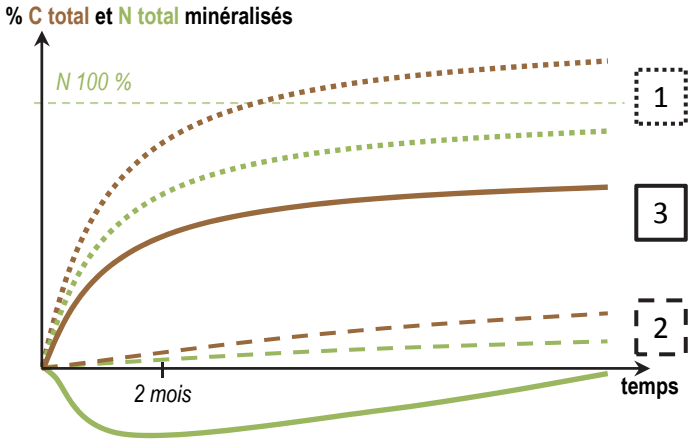
La plupart des Mafor présentent la particularité de contenir les trois principaux éléments fertilisants (N, P et K) pour partie sous forme organique plus ou moins facilement minéralisable. Le raisonnement des apports de Mafor nécessite donc de connaître leurs teneurs totales en N, P et K et la dynamique des stocks disponibles de ces nutriments dans les sols suite à l'épandage.

2.1. La valeur agronomique des Mafor : entre fertilisation et amendement

Le **potassium** et le **phosphore** se trouvent majoritairement sous forme minérale dans les Mafor. Les valeurs fertilisantes potassique et phosphatée des Mafor sont équivalentes à celles des engrais minéraux, à l'exception des Mafor contenant des minéraux phosphatés insolubles (les cendres par exemple).

L'**azote** des Mafor est essentiellement présent sous forme organique, à l'exception notable de quelques types de Mafor comme les lisiers, les digestats bruts liquides ou les effluents agro-industriels. La proportion de N présent sous forme organique et minérale (essentiellement ammoniacale), la stabilité de ses formes organiques et l'équilibre entre le carbone et l'azote (rapport C/N) sont très variables selon les Mafor, non seulement entre grands types de matières (agricoles, urbaines, industrielles) mais aussi au sein d'un même type (les fumiers, par exemple).
Avant épandage, les teneurs en N organique et minéral des Mafor varient en fonction de la nature de la matière organique (MO) présente dans la matière résiduaire initiale et de son évolution sous l'action des microorganismes, au cours du stockage ou durant les traitements éventuels.
Au moment de l'épandage, on peut distinguer trois grands types de comportements des Mafor dans le sol (Fig. 3).

Figure 3. Dynamique de minéralisation du C (en marron) et du N (en vert) après épandage

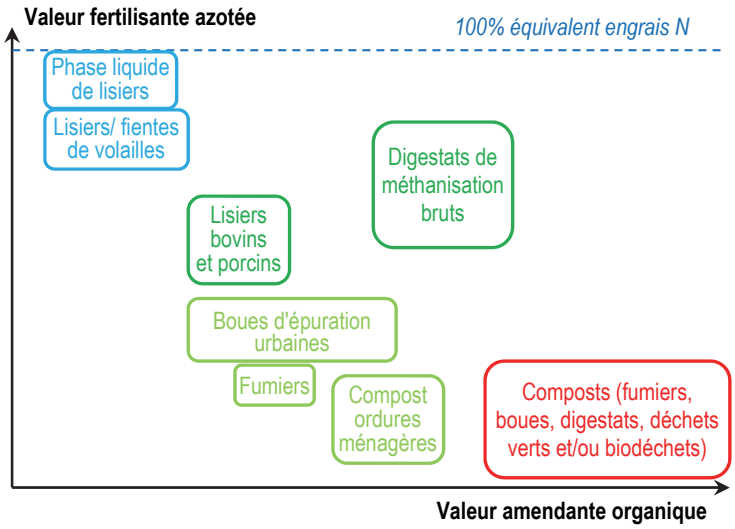


- Quand la vitesse et l'intensité de la minéralisation de la fraction organique sont élevées et que le rapport C/N de la Mafor est inférieur à la fourchette 8-15, la valeur fertilisante azotée est importante dans l'année qui suit l'apport (cas 1).
- Quand la MO est stable, sa minéralisation est lente ; la valeur fertilisante azotée à court terme est faible voire nulle, mais la

valeur amendante est importante car la Mafor enrichit le stock de MO du sol (cas 2).
- Enfin quand la MO de la Mafor est facilement biodégradable mais que le rapport C/N est élevé (supérieur à 8-15), les microorganismes du sol prélèvent du N minéral dans le stock du sol pour dégrader la MO, ce qui se traduit par une diminution transitoire de la disponibilité du N pour les plantes (cas 3).

La "valeur fertilisante azotée" et la "valeur amendante organique" des Mafor sont donc étroitement liées, et s'établit un gradient de distribution des Mafor. L'étude expérimentale des cinétiques de minéralisation des différentes Mafor permet de caractériser leur comportement dans le sol après épandage et de les positionner schématiquement le long de ce gradient (Fig. 4).Le niveau de détail avec lequel les diverses Mafor sont décrites dans la littérature est néanmoins insuffisant pour préciser le comportement des matières, et seuls des grands types (par exemple les "fumiers") sont souvent identifiés.

Figure 4. Valeur agronomique relative des Mafor



Les traitements qui peuvent être appliqués aux Mafor avant épandage modifient leur valeur agronomique et les déplacent le long du gradient "fertilisation – amendement" :
- le compostage stabilise le C et le N et déplace les matières vers le côté "amendement" du gradient (à droite dans la Fig. 4) ;
- la digestion anaérobie minéralise les formes organiques du N et déplace les matières à la fois vers le côté amendement et le côté fertilisation du gradient ;
- les traitements qui ont pour but d'éliminer de l'eau (séchage, déshydratation, filtration, séparation de phase…) s'accompagnent d'une perte d'azote ammoniacal, diminuant la valeur fertilisante des Mafor ainsi traitées (déplacement vers le bas dans la Fig. 4).

2.2. D'éventuelles pertes d'azote

Les modalités d'apport des Mafor et les problèmes d'adéquation entre la mise à disposition des éléments fertilisants et la période de prélèvement par les cultures peuvent être à l'origine de pertes d'azote dans l'atmosphère ou les eaux, causant des impacts environnementaux et une diminution de la valeur fertilisante :

- la **volatilisation d'ammoniac (NH_3)**, qui a lieu essentiellement dans les heures et les jours qui suivent l'épandage. Les Mafor qui contiennent le plus d'azote minéral (lisiers et digestats liquides ou bruts) sont aussi celles qui sont les plus sujettes à la volatilisation de NH_3. Le mode d'apport est le paramètre le plus déterminant ; lorsque cela est possible, leur enfouissement au moment ou juste après l'épandage limite efficacement ce processus.

- l'**émission de protoxyde d'azote (N_2O)**, résultant de processus biologiques réalisés par les microorganismes du sol. Les émissions seraient plus fortes avec les Mafor liquides (lisiers, boues liquides) que pour les Mafor solides (fumiers), compostées ou séchées (boues déshydratées, granules). Les digestats de méthanisation sont généralement moins susceptibles d'émettre du N_2O que les matières dont ils sont issus. La dose et les conditions physico-chimiques du milieu semblent être aussi déterminantes que le type de Mafor.

- la **lixiviation de nitrate (NO_3^-)**, si le N apporté par les Mafor est présent dans le sol à des moments où les cultures ne l'absorbent pas, et en période drainante. Les incertitudes sur les quantités de N présentes dans le sol au moment de la reprise du drainage augmentent la difficulté à prévoir des risques de lixiviation de nitrate. De façon générale néanmoins, plus les Mafor contiennent du N minéral ou facilement minéralisable, plus les risques de lixiviation sont élevés. L'installation de cultures intermédiaires pièges à nitrates peut constituer un levier de réduction de ce phénomène (voir étude "CIPAN"[2]).

La volatilisation de NH_3 et la lixiviation de NO_3^- peuvent engendrer des pertes de l'ordre de quelques kg à plusieurs dizaines de kg d'azote par hectare et par an, réduisant ainsi significativement la valeur fertilisante des Mafor. Par comparaison, les émissions de N_2O concernent des quantités d'azote nettement plus faibles, de l'ordre du kg par hectare et par an.

Des risques de pertes d'azote par émissions gazeuses et lixiviation existent également avec les engrais minéraux, mais ces derniers sont plus souples d'utilisation et leur application peut être plus facilement fractionnée pour s'adapter aux périodes de prélèvement par les cultures et aux conditions météorologiques.

2.3. D'autres risques d'émissions vers l'environnement

Le **carbone** apporté par les Mafor peut être partiellement émis dans l'atmosphère ou transféré vers les eaux, selon des mécanismes dont les déterminants sont plus ou moins bien connus :

- les **émissions de méthane (CH_4)** liées aux épandages de Mafor sont modestes. Ce sont les Mafor dont la matière organique subit une décomposition anaérobie (pendant le stockage, lors d'un traitement ou une fois enfouies dans le sol) qui émettent du CH_4 les premiers jours après apport. Les sols redeviennent ensuite des puits de CH_4.

- les émissions de **certains composés organiques volatils (COV)** sont à l'origine d'odeurs. Les épandages de Mafor ne sont pas comptabilisés dans les inventaires nationaux d'émission de COV, pourtant la part du C des Mafor présent sous forme de COV n'est pas négligeable (quelques % à quelques dizaines de %). Les émissions sont très rapides, et reviennent à un niveau de fond en quelques heures seulement.

- la **genèse de matière organique dissoute (MOD)** après épandage. Cette forme de MO peut favoriser le transfert de contaminants chimiques dans le sol et les eaux. L'épandage d'effluents d'élevage augmente la quantité de MOD de façon transitoire (quelques jours à quelques semaines après apport). Les connaissances manquent cependant sur l'évolution des formes chimiques de la MOD, susceptibles d'influer sur leur capacité à se lier aux contaminants.

Enfin, des apports répétés de Mafor prenant insuffisamment en compte les apports de **phosphore** contribueront aux risques de fuites de phosphore liées à l'accumulation de cet élément dans les sols.

2.4. Améliorer la gestion de la fertilisation avec les Mafor

En comparaison avec les engrais minéraux de synthèse, la bonne utilisation des Mafor se heurte à trois difficultés :
- les ratios N/P/K ne sont pas forcément optimaux et souvent inconnus, notamment dans les situations d'épandage sur prairies

[2] INRA (2012). *Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires, conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques*. Synthèse du rapport d'étude, 60 p.

(60% des surfaces fertilisées avec des Mafor le sont sans connaissance de leur teneur en azote) ;
- la disponibilité de l'azote à long terme est mal connue ;
- les techniques d'épandage ne permettent souvent pas de réaliser des épandages précis en termes de quantités apportées.

Les Mafor présentent l'avantage agronomique de constituer une voie d'apport de matière organique au sol, et la seule source renouvelable de phosphore. A l'échelle de la France, les quantités de P présentes dans les Mafor pourraient couvrir l'ensemble des prélèvements annuels de P par la production agricole.
En théorie, une substitution complète des engrais minéraux N-P-K par des Mafor serait possible à l'échelle d'une exploitation en mélangeant différentes Mafor (composts et digestats, fumiers et digestats…) de façon à obtenir des apports équilibrés en N, P et K par rapport aux besoins des cultures. Cependant, la faisabilité technique et économique de tels itinéraires de fertilisation reste à analyser. S'ajoutent les difficultés techniques à l'épandage et les contraintes réglementaires associées à la majorité des situations d'épandage, qui rendent cette pratique moins souple que l'usage des engrais minéraux.

Malgré la profusion des outils d'aide à la décision pour la gestion de la fertilisation (notamment azotée) destinés aux agriculteurs, leur utilisation réelle par les agriculteurs est faible, attribuée notamment à deux faits :
- ces outils se positionnent généralement à l'échelle de la parcelle alors que les agriculteurs gèrent le plus souvent la fertilisation à une échelle supra-parcellaire ;
- ces outils calibrent les dynamiques de minéralisation des Mafor, préoccupation première des agriculteurs, sur la base de résultats de laboratoire dont transposition au champ reste à améliorer. Ce facteur d'incertitude favorise la prise en compte d'une "marge de sécurité" et se traduit dans certaines situations par des excès de fertilisation minérale complémentaire.

3. Les Mafor sont associées à un transfert maîtrisable d'agents biologiques pathogènes

Les matières fécales contiennent une grande quantité de bactéries dont certaines sont pathogènes. Les virus, parasites, champignons, levures et prions peuvent également être véhiculés par les fèces. En raison de l'usage d'antibiotiques en médecine humaine et vétérinaire, les matières fécales constituent aussi un milieu favorable à la sélection de bactéries résistantes aux antibiotiques. Les effluents d'élevage et les boues d'épuration urbaines sont donc susceptibles de véhiculer ces agents biologiques à l'origine de deux risques sanitaires principaux **:**
- la transmission de maladies ou de parasites d'un troupeau à l'autre (épandage sur prairies ou cultures fourragères) ou à l'Homme (épandage sur des cultures maraichères ou des légumes de plein champ consommés crus ou peu cuits),
- la dissémination de l'antibiorésistance avec pour conséquence une diminution de l'efficacité des traitements antibiotiques chez l'Homme et les animaux.

3.1. Une maîtrise possible de la dissémination des pathogènes *via* des traitements

Tous les types de micro-organismes pathogènes ont été détectés dans des Mafor brutes, à l'exception des prions encore mal documentés. Des agents pathogènes sont fréquemment détectés dans les effluents d'élevage bruts, mais leur présence n'est pas systématique et difficile à prédire du fait de l'existence d'un portage sain. La fréquence de détection des pathogènes dans les boues d'épuration urbaines brutes est elle aussi élevée et systématique.

La problématique de la dissémination d'agents pathogènes dans l'environnement *via* l'épandage de Mafor concerne essentiellement les bactéries, les virus et les parasites (ainsi que, en théorie, les prions). Une fois dans le sol, la persistance de ces éléments biologiques varie de quelques jours à plusieurs mois en fonction, principalement, des caractéristiques intrinsèques des éléments biologiques, de la température et du taux d'humidité du sol (une température basse et un taux d'humidité élevé favorisant leur survie). La contamination des eaux provient essentiellement du ruissellement de surface qui entraîne les micro-organismes libres ou fixés aux particules.
Evaluer la contribution des Mafor à la contamination des sols et des eaux par ces éléments biologiques est cependant complexe : la présence de ces agents pathogènes dans les sols indépendamment des épandages de Mafor est avérée, et les techniques permettant de différencier l'origine des populations bactériennes trouvées dans un sol sont très difficiles à mettre en œuvre.

Le compostage, la digestion anaérobie thermophile, et le chaulage sont des traitements efficaces pour abattre la charge potentielle en agents pathogènes dans les Mafor, bien que la reprise du développement des populations ne soit pas exclue. Dans le cas d'un simple stockage, un allongement de sa durée et l'absence d'apports exogènes réguliers peuvent limiter la présence des pathogènes.

A ce jour, aucune étude publiée ne fait état d'une maladie animale diffusée par une contamination provenant d'un épandage de Mafor. Les voies multiples de contamination des animaux et de l'Homme (eau de boisson et d'irrigation contaminée, contact direct avec des animaux porteurs, produits animaux contaminés lors de l'abattage…) rendent difficile l'établissement d'un lien causal entre l'épandage des Mafor et la transmission de maladies.
Si des apports de fumier ou de lisier sur des cultures de produits végétaux consommés crus ont parfois été suspectés dans l'apparition de toxi-infections alimentaires collectives, des pathogènes sont cependant rarement détectés sur les végétaux au moment de la récolte, car leur survie décroît au fil du temps. Le respect de délais avant remise à l'herbe des animaux ou récolte des cultures constitue donc un levier d'action important à court terme pour limiter la contamination de la chaîne alimentaire.

3.2. La dissémination de l'antibiorésistance insuffisamment quantifiée

La probabilité de trouver des bactéries résistantes aux antibiotiques est élevée dans les effluents d'élevage bruts et les boues d'épuration urbaines brutes. Notons qu'une partie des antibiotiques ingérés par les Hommes et les animaux est excrétée sans être métabolisée. Les boues d'épuration urbaines et les effluents d'élevage sont donc susceptibles de contenir des substances antibiotiques toujours actives qui continuent d'exercer une pression de sélection, non encore évaluée, sur les bactéries du sol. La sélection de ces bactéries est influencée par d'autres paramètres du milieu, notamment la présence d'éléments métalliques : une présence élevée de cuivre et de zinc dans ces Mafor et les sols récepteurs pourrait favoriser la co-sélection de bactéries résistantes et leur dissémination.
Même si les travaux sont rares, certains traitements (le chaulage, la digestion anaérobie thermophile et le compostage) permettraient de diminuer la prévalence des bactéries résistantes dans les Mafor sans toutefois les éliminer.
Les bactéries déjà présentes dans le sol peuvent devenir résistantes aux antibiotiques par des échanges de gènes de résistance avec les bactéries véhiculées par les Mafor. L'épandage de ces Mafor est donc susceptible de favoriser la dissémination de l'antibiorésistance dans l'environnement.

La littérature scientifique existante ne permet cependant pas d'évaluer la contribution des Mafor à l'augmentation de l'antibiorésistance des espèces pathogènes de l'Homme et des animaux.

4. Un apport de contaminants chimiques dans les sols variable selon les Mafor

Les contaminants chimiques susceptibles d'être présents dans les Mafor sont des **éléments traces minéraux** (ETM)[3] et des **composés traces organiques** (CTO). Les ETM sont naturellement présents dans les sols, et les CTO sont essentiellement d'origine anthropique. Si certains ETM sont des oligo-éléments nécessaires au bon fonctionnement du métabolisme des êtres vivants, tous les ETM et CTO présentent une toxicité au-delà de certaines concentrations.

Actuellement, 9 ETM et 10 CTO sont réglementés dans le droit français applicable à l'épandage de Mafor (teneurs-seuils dans les Mafor et/ou les sols récepteurs, et flux annuels maxima à respecter pour que les épandages soient autorisés). Tous les ETM et la plupart des CTO ne sont donc pas réglementés. De plus, en fonction de leur qualification juridique, toutes les Mafor ne sont pas réglementées selon les mêmes valeurs seuils.
Dans les textes réglementaires adoptés par les divers pays européens, l'hétérogénéité des contaminants retenus et des valeurs-seuils qui leur sont appliquées semble témoigner de la difficulté à aboutir à des consensus au sujet des obligations à retenir.

La majorité des contaminants susceptibles d'être apportés au sol par les Mafor l'est également par d'autres voies de contamination : retombées atmosphériques, traitements phytosanitaires, irrigation… Si les engrais minéraux (notamment phosphatés) apportent certains ETM (voir Fig. 5), leur substitution par des Mafor a pour corollaire d'augmenter les apports en d'autres contaminants chimiques, notamment le cuivre, le zinc, le plomb et les substances pharmaceutiques. De plus, la spécificité des apports de contaminants chimiques *via* les Mafor tient à la nature de la matrice que ces dernières constituent et dans laquelle se trouvent les contaminants chimiques ; la majorité des Mafor contiennent de la MO à laquelle certaines formes chimiques des contaminants peuvent se lier. Cette liaison conditionne la **persistance** des contaminants dans le sol, leur **mobilité** depuis le sol vers les eaux, les végétaux et les animaux, et leur **biodisponibilité** pour les végétaux et les animaux.
Connaître la répartition des formes chimiques sous lesquelles les contaminants se trouvent dans les Mafor et leur évolution après épandage, sont deux enjeux pour évaluer l'innocuité des Mafor.

4.1. Une accumulation lente des ETM dans les sols

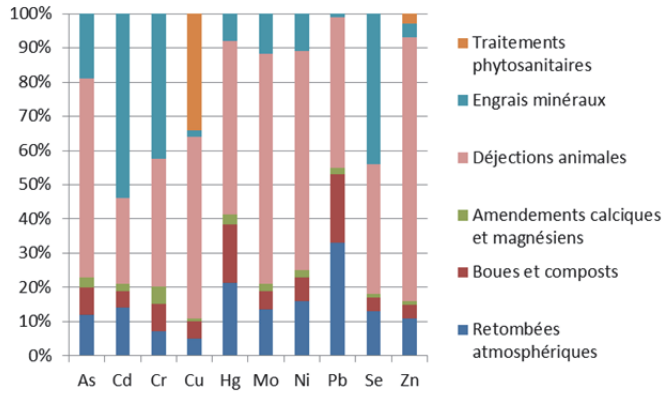
Le cuivre et le zinc sont les ETM dont les teneurs sont les plus élevées dans les Mafor. Les concentrations en ETM rencontrées en France dans les boues d'épuration urbaines et les composts d'ordures ménagères et/ou de déchets verts sont largement inférieures aux seuils réglementaires. Non réglementés sur ce plan, les effluents d'élevage présentent également des teneurs en ETM inférieurs aux seuils de la réglementation applicable aux boues d'épuration urbaines et aux effluents et déchets issus d'Installations classées pour la protection de l'environnement.

Les données plus rares concernant les sédiments et les cendres de biomasse les situent en deçà des seuils réglementaires auxquels ils sont susceptibles d'être soumis.

La contribution des différentes sources d'ETM au flux d'apport global sur les sols agricoles français est aujourd'hui bien estimée pour certains ETM, notamment ceux qui sont réglementés. A l'échelle nationale, les déjections des animaux d'élevage (émises au pré ou épandues) sont une voie d'apport importante, majoritaire pour de nombreux ETM (voir Fig. 5).

[3] Les 68 éléments métalliques ou métalloïdes qui composent la croûte terrestre avec une concentration inférieure à 0,1%.

Figure 5. Flux annuel de 10 ETM apportés aux sols agricoles en France : contribution des différentes sources à l'échelle nationale



Source : Sogreah 2007

A l'échelle de la parcelle, les parts relatives des diverses voies d'apport varient fortement en fonction des pratiques agricoles, notamment les choix de fertilisation (parts relatives de la fertilisation minérale et organique) et de traitements phytosanitaires. Les composts et boues urbains qui contribuent peu aux apports totaux d'ETM à l'échelle nationale, peuvent avoir une importance nettement plus grande dans certaines parcelles et régions du fait de leur utilisation relativement concentrée près des agglomérations les plus importantes (Île-de-France, Picardie, Nord-Pas-de-Calais et PACA notamment). Les ETM ne sont pas dégradés, et se caractérisent par leur faible mobilité dans les sols, du fait de leur liaison avec les particules organiques de la Mafor et/ou du sol. Si l'effet d'apports de Mafor (à doses agronomiques normales) sur la teneur totale en ETM déjà présents dans le sol est très faible à l'échelle de quelques années, tout apport régulier, même en faible quantité, contribue à leur accumulation progressive dans le milieu. L'augmentation sensible des teneurs en Cu et en Zn dans certains sols en Bretagne est ainsi associée à l'épandage régulier d'effluents d'élevage.

Par ailleurs, certaines formes chimiques des ETM sont connues pour être plus mobiles que d'autres et sont plus susceptibles d'être transférées vers les eaux et les matières premières alimentaires.

L'évolution de la mobilité des ETM sur le long terme après épandage ne fait pas consensus. La minéralisation de la MO est susceptible d'augmenter la mobilité des ETM qui y sont liés, mais aucun relargage massif d'ETM n'a été démontré. Cependant, un tel effet ne peut être exclu, en particulier si certains paramètres du sol évoluent fortement (le pH notamment).

Les traitements que peuvent subir les matières avant épandage influencent la concentration et la mobilité des ETM. Tout traitement qui élimine une phase (l'eau par séchage, la matière organique par digestion anaérobie, compostage ou combustion) concentre mécaniquement les ETM dans la Mafor ainsi traitée. A l'inverse, certains traitements qui nécessitent l'ajout d'une autre matière à la matière résiduaire initiale (ajout de déchets verts lors du compostage des boues d'épuration, addition de chaux lors du chaulage) entraînent une dilution des ETM si la matière ajoutée n'est pas contaminée. Le compostage, la digestion anaérobie, le chaulage et la pyrolyse tendent à diminuer leur mobilité.

4.2. Une multiplicité de CTO aux comportements variables et difficiles à évaluer

A l'inverse des ETM, les CTO sont plus ou moins dégradables. Cette dégradation, qu'elle soit biotique ou abiotique, conduit à la transformation des molécules-mères connues et identifiées, en métabolites eux-mêmes très peu recherchés et étudiés. Par ailleurs, certains CTO se lient très fortement avec les particules organiques de la Mafor ou du sol, formant des "résidus liés" que les méthodes d'extraction chimique visant à mesurer les teneurs en contaminants

ne peuvent quantifier. En conséquence, les teneurs totales en CTO des Mafor ne sont pas toujours connues. On parle plutôt de "dissipation" lorsqu'une diminution apparente de la teneur en CTO est observée, car elle peut être due à divers mécanismes (disparition, dégradation, formation de résidus liés).

On identifie deux grands types de CTO selon leur demi-vie apparente dans le sol (durée au bout de laquelle 50% des molécules se sont dissipées) :
- les CTO persistants, dont la demi-vie apparente est de une à plusieurs années : PCB, HAP, dioxines, retardateurs de flamme…
- les CTO non persistants dont la dissipation est plus rapide (demi-vie de quelques jours à quelques mois) : phtalates, bisphénol A, détergents…
En France, la réglementation concerne 10 CTO persistants (trois HAP et sept PCB). Les molécules pharmaceutiques et pesticides, CTO spécifiques des effluents d'élevage et des Mafor d'origine urbaine, ne sont pas réglementées.
Les données françaises sur les teneurs dans les Mafor concernent essentiellement les boues d'épuration urbaines et les effluents d'élevage :
- pour les 10 CTO réglementés, les concentrations dans les Mafor sont inférieures aux seuils réglementaires. Cependant, des seuils n'existent que pour une faible part des CTO potentiellement présents. L'abaissement des seuils réglementaires et l'inclusion de molécules supplémentaires sont en cours de réflexion à la Commission européenne. Par exemple, la proposition dite "End of waste criteria"[4] définit une teneur seuil sur une somme de 16 HAP, que certains composts urbains et boues d'épuration digérées approchent voire dépassent.
- parmi les CTO non réglementés, les molécules à fort usage domestique et industriel et les molécules pharmaceutiques sont les plus étudiées. Les antibiotiques sont fréquemment détectés dans les boues d'épuration urbaines et les effluents d'élevage.

La digestion anaérobie et le compostage s'accompagnent d'une dissipation des CTO contenus dans les Mafor. Les mécanismes sous-jacents ne sont que peu élucidés, et les résultats parfois contradictoires selon les CTO étudiés. Des métabolites, dont la nature et la toxicité sont peu connues, peuvent aussi être formés.

Contrairement aux ETM, il n'existe pas d'étude estimant le poids des diverses sources dans l'apport de CTO sur les sols français. Les travaux menés dans des conditions d'apport de Mafor conformes à la réglementation et en doses agronomiques ne montrent pas d'accumulation dans les sols, mais des transferts vers les eaux sont susceptibles d'être observés quoique restant faibles.

4.3. L'accumulation de contaminants chimiques dans les produits animaux et végétaux ne peut être exclue

Les travaux existants n'évaluent pas le risque de transfert de contaminants chimiques dans les végétaux ainsi que dans les produits animaux en conditions réelles d'épandage. En revanche, certains mécanismes de transferts sont connus et avérés en conditions contrôlées de laboratoire, suggérant que la voie d'exposition que constituent les Mafor pourrait être à l'origine de transferts dans les matières premières alimentaires.

Chez les végétaux, les racines tendent à accumuler davantage les ETM que les feuilles et les tiges, les fruits et grains étant généralement les organes les moins concernés. De plus, certaines espèces végétales sont connues pour accumuler plus fortement certains ETM sans pâtir d'effets phytotoxiques (tournesol, laitue, blé dur…), d'autres sont naturellement moins accumulatrices (cas du maïs en présence de zinc).

Chez les animaux, les voies d'exposition aux contaminants chimiques sont multiples : ingestion de fourrage, de sol, de pédofaune ou d'eau d'abreuvement contaminés par des sources diverses. Sur cette question, les CTO sont mieux documentés que les ETM dans la littérature scientifique. Les travaux démontrent la forte capacité de certains contaminants organiques persistants et lipophiles (tels que les PCB) à atteindre la circulation systémique après ingestion durant le transit dans le tractus digestif, et leur tendance à s'accumuler dans les tissus graisseux, le lait ou les œufs le cas échéant. Lorsqu'ils atteignent la circulation systémique, les ETM ont tendance à s'accumuler plutôt dans le foie et les reins.

5. Options pour optimiser l'usage des Mafor, et besoins de recherches

Les résultats de l'ESCo suggèrent des leviers d'intervention qui pourraient permettre d'optimiser l'utilisation des Mafor, c'est-à-dire maximiser leur efficacité sur le plan agronomique et minimiser les risques environnementaux et de contamination des écosystèmes sous réserve de l'acceptation de la pratique.

5.1. L'importance des caractéristiques des matières "primaires" et l'efficacité des traitements appliqués

L'ESCo s'est focalisée sur les matières épandues, et non sur les filières de traitement depuis la collecte. Or les caractéristiques des matières "primaires" influent sur celles des Mafor. Par exemple, les recommandations actuelles concernant l'alimentation porcine ont conduit à une diminution des teneurs en cuivre et en zinc dans les effluents. L'importance du tri des matières "primaires" avant traitement avec la mise en place des collectes sélectives tend également à diminuer les concentrations en ETM dans les composts de déchets ménagers.

L'ESCo n'avait pas pour objectif d'évaluer les paramètres techniques des traitements applicables aux Mafor, mais ces traitements conditionnent fortement les caractéristiques des Mafor, et constituent un levier important pour optimiser leur usage. En particulier, le bilan des effets des traitements reste à réaliser, car ils agissent simultanément sur la valeur agronomique des Mafor et sur leur innocuité, parfois de façon contradictoire.

Ainsi, intégrer l'ensemble des caractéristiques des filières de production et de traitement des déchets dans une évaluation comparative semble nécessaire pour mieux connaître et prédire les effets de l'épandage des Mafor qui en sont issues. Ces connaissances et ces traitements devraient permettre d'améliorer le taux de recyclage des éléments nutritifs tout en réduisant les teneurs en contaminants, entre le moment de la collecte des matières "primaires" et l'obtention de la Mafor "prête à épandre". La mise en place d'une typologie des Mafor et de modèles intégrant leur origine (matière primaire et traitement appliqué) pour prédire les effets potentiels sous certaines conditions d'utilisation semble indispensable à l'optimisation de leur usage.

5.2. Les pratiques d'épandage, la maîtrise des systèmes de culture et les modalités d'usage des parcelles

L'ESCo montre l'importance des pratiques d'épandage et des périodes d'apport dans les effets observés, alors qu'elles font encore peu l'objet de recherches. L'enfouissement des Mafor semble déterminant pour l'efficacité agronomique et la réduction des volatilisations. L'homogénéité de la répartition et la régularité des quantités épandues, questions non documentées dans la littérature, sont pourtant déterminantes dans la présence éventuelle de dépôts localisés de Mafor qui pourraient générer des excès de N ou des concentrations élevées en contaminants.

Réaliser un bilan global des bénéfices agronomiques et des risques environnementaux (*via* des Analyses du Cycle de Vie par exemple)

[4] Critères permettant à un "déchet" d'accéder au statut de "produit".

nécessite de caractériser finement les effets des épandages, notamment indirects : conséquences de l'augmentation du taux de MO dans les sols, émissions de GES associées aux pratiques…

Concernant l'innocuité de la pratique, les délais à respecter avant remise à l'herbe des animaux ou avant la récolte des cultures constituent un levier d'action important à court terme pour limiter la contamination de la chaîne alimentaire. A plus long terme, il serait important de prédire les effets d'apports répétés de Mafor sur les teneurs en contaminants dans les sols, leur biodisponibilité pour les cultures et les animaux, et leur mobilité dans les sols. Pour cela, les essais de longue durée en plein champ pourraient nourrir des modèles prédisant sur le long terme les dynamiques associées des matières organiques et des contaminants dans les sols, et testant d'autres scénarios d'usage des Mafor.

5.3. Gestion territoriale et prise en compte des acteurs

L'ESCo a montré le peu de travaux récents sur les effets économiques de l'usage des Mafor ou son acceptabilité par différents acteurs. Aucune étude économique récente n'a été publiée sur les marchés qui concernent des Mafor. Pourtant des transferts de Mafor entre régions françaises existent déjà, ainsi que des importations depuis d'autres pays européens. Quelques travaux épars existent sur la balance coût/bénéfice de cette pratique ; des résultats supplémentaires apporteraient des éléments de réflexion sur l'intérêt de développer de telles filières de traitement, transport et commercialisation des Mafor entre régions excédentaires et régions déficitaires en ressources.
Par ailleurs, la valorisation des Mafor d'origine urbaine ou industrielle constitue un moyen de substitution des engrais minéraux dans les régions péri-urbaines et/ou déficitaires en élevage. L'acceptabilité des acteurs directement concernés se joue sur les questions de risque, de nuisance et d'équité.

5.4. Poursuivre les recherches sur les contaminants

L'innocuité des Mafor ne se pose pas de la même manière selon les Mafor car elles ne sont pas toutes susceptibles de contenir les mêmes contaminants (Tableau 2). Certaines Mafor sont encore peu documentées sur le plan de leur innocuité (cas des effluents industriels et de nombreuses Mafor "produits"). Les métabolites issus de la dégradation des contaminants restent à étudier. Par ailleurs, des contaminants émergents tels que les nanoparticules, susceptibles d'être présentes dans les effluents et déchets urbains, commencent à être étudiés.

Tableau 2. Principaux types de contaminants susceptibles d'être présents dans certaines Mafor

Mafor	Types de contaminants		
	Agents biologiques	ETM	CTO
Effluents d'élevage	Pathogènes associés aux matières fécales Bactéries résistantes aux antibiotiques	Cuivre, zinc	Molécules pharmaceutiques (antibiotiques, hormones)
Boues d'épuration urbaines		Cuivre, zinc, autres ETM	Large spectre dont molécules pharmaceutiques
Composts urbains	Pathogènes associés aux végétaux ou aux résidus de cuisine	Large spectre	Résidus de pesticides
		Large spectre	Large spectre (résidus de pesticides si déchets verts)
Cendres	Absence	Large spectre selon la nature du combustible	HAP produits lors de l'incinération
Sédiments	Bactéries résistantes aux antibiotiques ?	Large spectre	HAP, PCB avérés

Pour garantir l'innocuité des produits agricoles, la règlementation doit considérer l'ensemble des risques sanitaires induits par les différents contaminants apportés par les Mafor. Ces risques dépendent principalement de la composition des Mafor et des doses cumulées apportées. Ils ne sont pas modifiés par le statut juridique ("déchet", "produit", "sous-produit") des Mafor. Les critères règlementaires doivent donc apporter une réponse adaptée à ces risques et ce quel que soit le statut des Mafor. Si les critères actuels de flux d'apport pour un usage agronomique "normal" semblent suffisants pour garantir l'innocuité des matières premières destinées à la consommation humaine sur le plan des contaminants réglementés, la décision de mettre en place des critères d'innocuité pour de nouveaux contaminants ou des niveaux de seuils plus stricts nécessite de réaliser une évaluation des risques sanitaires sur la base des éléments rassemblés dans cette ESCo.

Pour en savoir plus :

Houot S., Pons M.N., Pradel M., Caillaud M.A., Savini I., Tibi A. (éditeurs), 2014. *Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques.* Expertise scientifique collective, Inra-CNRS-Irstea (France).
Une version provisoire du rapport d'expertise est disponible sur les sites internet de l'Inra, du CNRS et d'Irstea. La version définitive la remplacera à l'automne 2014. Une vidéo du colloque de restitution de l'ESCo est également en ligne.

Organisation et principes de l'expertise scientifique collective (ESCo)

L'ESCo est une activité d'expertise institutionnelle, régie par la charte nationale de l'expertise à laquelle l'Inra, le CNRS et Irstea ont adhéré en 2011. Elle se définit comme une activité d'analyse et d'assemblage de connaissances scientifiques produites dans des champs très divers du savoir, et pertinentes pour éclairer l'action publique. Cet état des connaissances le plus complet possible, et son analyse, ne fournit ni avis, ni recommandations, ni réponses opérationnelles aux questions qui se posent aux gestionnaires.

L'analyse est conduite par un collectif pluridisciplinaire d'experts chercheurs d'origines institutionnelles diverses. Pour l'ESCo "Mafor", conduite par la DEPE (Inra), une trentaine d'experts français et étrangers issus de différents organismes ont été mobilisés, leurs compétences relevant de l'agronomie, de la chimie, de la microbiologie, de l'écotoxicologie, de l'économie, de la sociologie, du droit… Le travail des experts s'est appuyé sur un corpus bibliographique d'environ 3000 références, composées essentiellement d'articles scientifiques auxquels se sont ajoutés des statistiques, des rapports d'étude et des ouvrages. Cet exercice se conclut par la production d'un rapport qui rassemble les contributions des experts, et d'une synthèse à l'usage notamment des décideurs.

INRA
SCIENCE & IMPACT
Délégation à l'Expertise scientifique, à la Prospective et aux Etudes
147, rue de l'Université
75338 Paris Cedex 07
France
Tél. : + 33 1 42 75 94 90
Fax : + 33 1 42 75 91 72
www.inra.fr

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie