



**HAL**  
open science

## **Impact du RECYclage du phosphore (P) à partir de biomasse résiduaire pour la production de fertilisants déchet-sourcés : potentialités techniques, Economiques et Environnementales**

Marilys Pradel, Lynda Aissani, Pierre Thiriet, Emmanuel Piron, Loïc Sauvée

### ► To cite this version:

Marilys Pradel, Lynda Aissani, Pierre Thiriet, Emmanuel Piron, Loïc Sauvée. Impact du RECYclage du phosphore (P) à partir de biomasse résiduaire pour la production de fertilisants déchet-sourcés : potentialités techniques, Economiques et Environnementales. INRAE. 2025, 10 p. <hal-05020704>

**HAL Id: hal-05020704**

**<https://hal.inrae.fr/hal-05020704v1>**

Submitted on 4 Apr 2025

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.



HAL Authorization

## SYNTHÈSE DU PROJET RECYPEE

Février  
2025

Impact du RECYclage du phosphore (P)  
à partir de biomasse résiduaire : potentialités  
techniques, Economiques et Environnementales

Le Phosphore (P) issu des matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) a une valeur fertilisante équivalente à celle des engrais phosphatés naturels et son recyclage permettrait de réduire la pression sur la ressource P non renouvelable issue des roches phosphatées.

Évaluer finement ce potentiel de substitution nécessite d'identifier des stratégies de recyclage adaptées aux besoins et à la disponibilité du P à l'échelle des territoires selon des approches techniques, socio-économiques et environnementales pertinentes.

Le projet RECYPEE a eu pour objectif d'identifier les leviers aux verrous scientifiques et techniques liés à la mise en place de ces stratégies en apportant des connaissances sur i) les potentialités de recyclage du P issu des MAFOR en fonction des territoires, ii) les facteurs déterminant l'usage du P issu des MAFOR par les agriculteurs, et iii) le recours à une méthodologie d'évaluation environnementale pour mesurer l'incidence du recyclage sur les impacts environnementaux dont notamment l'enjeu des ressources. Il s'est appuyé sur deux territoires d'études, le département de l'Allier en région Auvergne-Rhône-Alpes et la région des Hauts-de-France.

Le projet RECYPEE a ainsi produit une analyse technique, socio-économique et environnementale du recyclage du P à partir de MAFOR au travers de trois volets scientifiques et techniques synthétisés dans les paragraphes suivants :

- le développement d'un modèle conceptuel de recyclage contextualisé du P, intégrant en particulier les préférences d'usage des agriculteurs. Ce modèle intègre des éléments de contextualisation et de spatialisation dans les méthodes d'évaluation de la criticité des ressources appliquées au phosphore. La méthodologie mise en place s'est appuyée sur i) l'estimation des besoins des cultures en prenant en compte les contraintes réglementaires d'épandage, ii) l'estimation des gisements de P provenant des MAFOR, iii) la construction d'un modèle conceptuel de recyclage basé sur l'intégration de *drivers* (déterminants) identifiés au travers d'enquêtes réalisées auprès d'un échantillon d'agriculteurs.
- L'évaluation des impacts environnementaux des scénarios territorialisés du recyclage du P identifiés préalablement. Ces impacts environnementaux ont été évalués au moyen de la méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie (ACV). L'ACV a été conduite sur un ensemble de scénarios territorialisés du recyclage des MAFOR définis pour le département de l'Allier et intégrant les préférences d'usage des agriculteurs.
- L'identification des déterminants techniques et socio-économiques contribuant ou non à l'utilisation des MAFOR par les agriculteurs. Les déterminants sont d'ordre : i) agronomique en lien avec la valeur fertilisante des MAFOR et leur potentiel de substitution agronomique vis-à-vis des engrais minéraux, ii) technique en lien avec la qualité d'épandage de ces MAFOR, iii) logistique en lien avec la disponibilité et l'accès à des gisements de proximité, iv) réglementaires et v) socio-économiques en lien avec l'image qu'ont les MAFOR auprès des agriculteurs et du grand public, mais aussi en lien avec l'existence ou non d'un marché pour ces dernières.

À partir de cette analyse, il a été possible d'identifier des freins et leviers pour le recyclage du P issu des MAFOR à l'échelle des territoires. Ces freins et leviers sont présentés en dernière partie de cette synthèse.

# 1. Développement d'un modèle conceptuel de recyclage contextualisé du P intégrant les préférences d'usage des agriculteurs

La roche phosphatée utilisée pour la fabrication des engrais minéraux agricoles est considérée comme une ressource critique par l'Union européenne depuis 2011. L'amélioration du taux de recyclage du P issu des biomasses résiduelles comme les effluents d'élevage et les boues de stations de traitement des eaux usées (STEU) est l'une des principales solutions proposées par la Commission Européenne pour réduire cette criticité. Toutefois, l'analyse du potentiel de recyclage du P issu des MAFOR interroge sur les gisements existants, leurs disponibilités, mais aussi sur l'efficacité et l'effectivité du recyclage.

L'efficacité du recyclage du P des MAFOR se définit comme étant la capacité du P des MAFOR à se substituer au P des engrais minéraux phosphatés en réponse à un besoin en P des cultures. Pour cela, il est nécessaire de prendre en compte l'efficacité agronomique relative du P, traduite par le coefficient d'équivalence en engrais minéral (Keq) qui permet de comparer le pouvoir fertilisant des MAFOR à ceux des engrais minéraux phosphatés, afin de ne pas surestimer le potentiel de fertilisation en P des MAFOR. L'effectivité de recyclage du P des MAFOR reflète quant à elle la quantité de P des MAFOR qui serait potentiellement utilisée par les agriculteurs en substitut au P des engrais minéraux phosphatés, notamment au regard de leurs préférences d'usage. Cette efficacité est conditionnée par de nombreux facteurs tels que les contraintes économiques, l'acceptabilité sociale, la qualité agronomique et sanitaire des MAFOR, ou encore les contraintes réglementaires.

Au regard de ces éléments, il est important que le recyclage du P soit à la fois efficace et effectif, mettant ainsi en lumière un besoin de contextualisation du recyclage des MAFOR et des différents facteurs qui influencent les préférences d'usage des MAFOR par les agriculteurs. Considérer le recyclage du P dans son contexte (i.e. l'ensemble des paramètres influençant le comportement de l'objet dans le temps et dans l'espace) nous a amené à construire un modèle conceptuel permettant de mettre en regard offre et besoin en P et de calculer ainsi un indicateur contextualisé du recyclage du P en agriculture. Ce modèle repose sur trois principales composantes : le besoin en P, l'offre en P et les *drivers* d'usage du P issu des MAFOR d'un territoire. Il a été appliqué au territoire de l'Allier.

Le besoin en P des cultures du territoire de l'Allier a été déterminé sur la base des principes du raisonnement de fertilisation phosphatée proposé par le COMIFER (Comité Français d'Étude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée). Il a été calculé en considérant la teneur en P assimilable du sol, l'exigence de la culture, les écarts de teneurs entre la fourniture du sol et les seuils d'impasse et de renforcement, le rendement voulu et l'historique de la parcelle. Le besoin total des cultures de l'Allier s'élève à 9 643 tonnes de  $P_2O_5$ . Toutefois, seuls 64 % de ce besoin peut être apporté par des MAFOR en raison des interdictions réglementaires d'épandage (distance d'épandage, parcelles en pente...). Aussi, 3 495 t de  $P_2O_5$  devront toujours être apportées sous forme d'engrais minéraux phosphatés (Figure 1).

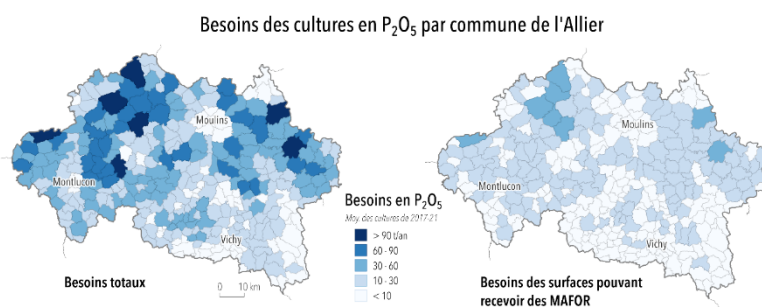


Figure 1. Quantités de P à apporter pour satisfaire les besoins totaux en P de l'ensemble des surfaces en COP et prairies de l'Allier (à gauche) et des surfaces pouvant recevoir des MAFOR

L'offre en P est conditionnée par la disponibilité des gisements de MAFOR présents sur le territoire. Seuls les effluents d'élevage et les boues de STEU ont été quantifiés dans cette étude. Les autres types de MAFOR sont exclus en raison de leur pouvoir amendant très élevé (cas du compost et du biochar), de la faible disponibilité du P, de la difficulté d'approvisionnement ainsi que de leur méconnaissance par les agriculteurs en France (sédiments, cendres, struvite, biochar, cendres), ou du fait de l'indisponibilité des données cartographiques (cas des digestats de méthanisation). Le gisement de P issu des boues de STEU correspond à l'ensemble de la production annuelle de boues par les STEU présentes sur le territoire français et dont l'usage est adapté à la fertilisation phosphatée des sols agricoles. La teneur en P biodisponible (exprimé en  $P_2O_5$ ) est estimée à partir de la quantité de boues, la teneur en  $P_2O_5$  de la boue et du coefficient d'équivalent en engrais minéral. L'inventaire à l'échelle de la France recense près de 16 941 t/an de  $P_2O_5$  contenu dans les boues de STEU à destination des parcelles agricoles (Figure 2).

Le gisement de P issu des activités d'élevage correspond à l'ensemble de la production annuelle des effluents d'élevage présents sur le territoire français. L'analyse porte uniquement sur les effluents bruts sans tenir compte d'éventuels traitements complémentaires. Les quantités de  $P_2O_5$  des effluents d'élevage n'étant pas répertoriées dans les bases de données disponibles, elles ont été calculées à partir des données sur l'inventaire des cheptels issu du recensement agricole à l'échelle des communes, des données sur les quantités de déjections produites par cheptel et de leur répartition en fumier, lisier et au champ, et des teneurs en P des effluents d'élevage. Près de 843 838 t/an de P (exprimé en  $P_2O_5$ ) sont issues des effluents d'élevage en France (Figure 3).

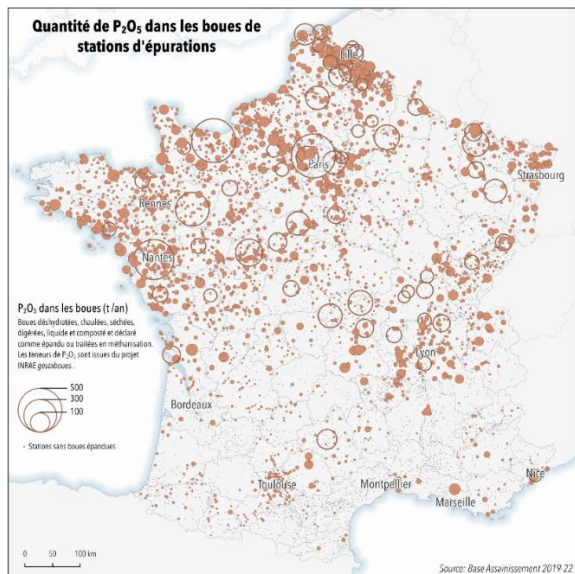


Figure 2. Carte des quantités de  $P_2O_5$  disponibles dans les boues de STEU à l'échelle de la France.

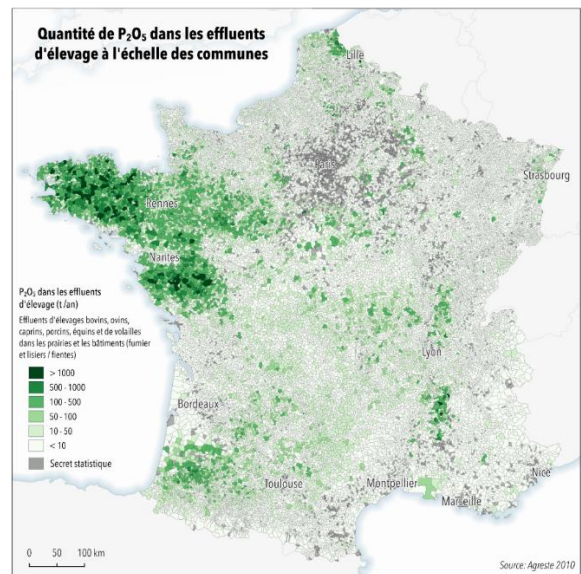


Figure 3. Carte de la quantité de  $P_2O_5$  estimée dans les effluents d'élevage à l'échelle des communes.

Au final, l'offre en MAFOR du territoire de l'Allier constituée des boues et des effluents d'élevage représente un total de 386 168 tonnes de matières sèches, soit 10 105 tonnes de  $P_2O_5$  disponibles réparties entre les fumiers volailles (38 %), les fientes de volailles (37%), les fumiers et lisiers de bovins (15 %), les fumiers et lisiers de porcs (5%), les fumiers d'ovins (2%) et les boues de STEU (2%).

L'originalité du modèle proposé repose sur l'intégration de *drivers* prépondérants de l'effectivité du recyclage du P identifiés dans un contexte donné tel qu'un territoire (i.e. passage des gisements disponibles aux gisements qui seront utilisés par les agriculteurs pour substituer le P des engrais minéraux). Ces *drivers*, définis donc comme étant tout facteur influençant l'utilisation du P des MAFOR en agriculture comme substitut aux engrais minéraux phosphatés, ont été identifiés à travers une enquête semi-directive et un questionnaire en ligne. Une analyse approfondie des enquêtes a permis d'identifier les *drivers* influençant l'utilisation des MAFOR que nous avons pu classés en six catégories (Figure 4) :

- la **qualité** de la MAFOR (valeur agronomique, teneurs en contaminants, présence de graines d'adventices),
- la **facilité d'approvisionnement et d'utilisation** (disponibilité, distance de transport, logistique, facilité d'épandage),
- le **positionnement de l'agriculteur** (connaissance et confiance dans les MAFOR, habitude d'usage),
- le **coût** (de production de la MAFOR, de transport et d'épandage rendu racine),
- la **réglementation**
- les **problématiques liées à l'environnement et à la société** (nuisances olfactives, opinion publique, problème de tassement des sols).

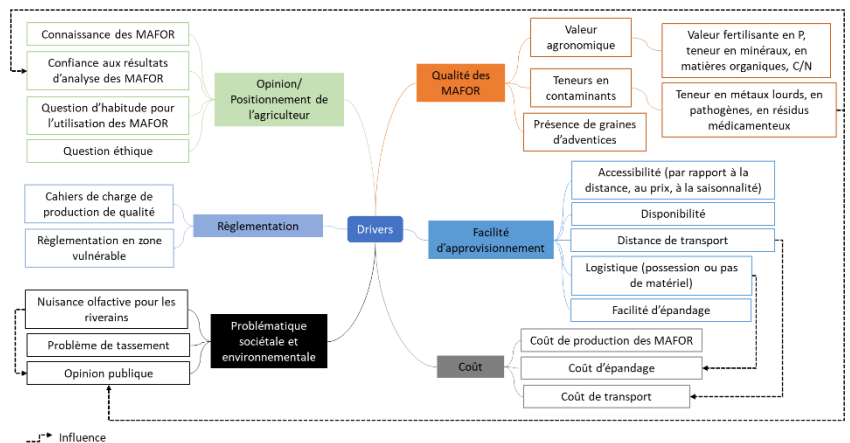


Figure 4. Principaux drivers identifiés influençant l'utilisation des MAFOR

Pour identifier plus finement les arbitrages réalisés entre ces *drivers* et un ordre de préférence dans l'usage des MAFOR, un nouveau questionnaire en ligne a été proposé au même groupe d'agriculteurs. L'analyse de ce questionnaire a permis d'une part d'identifier les préférences d'usages des MAFOR dites « déclarées » (par une notation directe des MAFOR préférées par les agriculteurs) et celles dites « révélées » par l'usage de la méthode ELECTRE III sur la base de 4 critères identifiés comme prépondérant à l'issue du questionnaire (valeur fertilisante, teneur en éléments trace métalliques, facilité d'épandage et teneur et potentiel germinatif des graines d'adventices contenues dans les MAFOR) et les valeurs correspondantes issues d'analyses des MAFOR.

Au final, sur la base des notes données par les agriculteurs, nous avons retenu comme MAFOR déclarées préférées sur le territoire de l'Allier tous les effluents d'élevage (volailles, bovin, équin, porc, ovin et caprin). La quantité de P des MAFOR pouvant se substituer aux engrais minéraux phosphatés dans ce cas correspond à la somme de la quantité de P provenant des effluents d'élevage, soit 9 703 tonnes de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Les résultats montrent que les quantités de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> issues de l'ensemble des MAFOR de l'Allier sont légèrement supérieures aux besoins totaux des cultures du territoire. L'excédent est estimé à 462 tonnes de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, soit 5% du total de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> issu des MAFOR. Cependant, en tenant compte des contraintes réglementaires pour l'épandage de ces matières, le surplus de production de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> est alors estimé à **environ 30%**. Dans le cas du département de l'Allier, l'offre en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> issu des MAFOR suffit donc à combler le besoin du territoire. La mise en place d'une évaluation contextualisée permet donc d'identifier de manière plus fine les besoins pouvant être satisfaits par des MAFOR.

Une synthèse des éléments évoqués ci-dessus ainsi que le taux de recyclage contextualisé sont présentés respectivement pour le cas des préférences d'usage révélées en Figure 5 et celui des préférences déclarées en Figure 6.

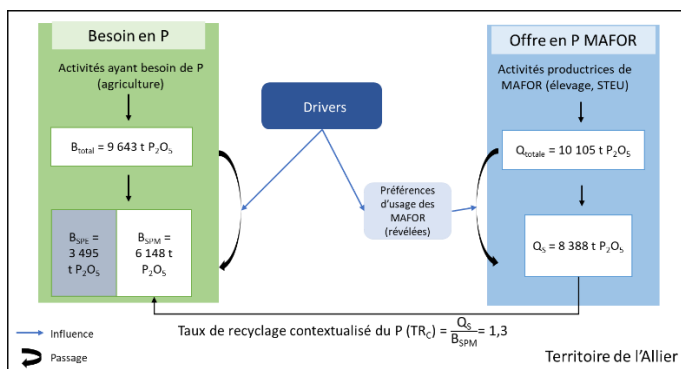


Figure 5. Synthèse des valeurs du modèle pour le cas du territoire de l'Allier (préférence révélée)

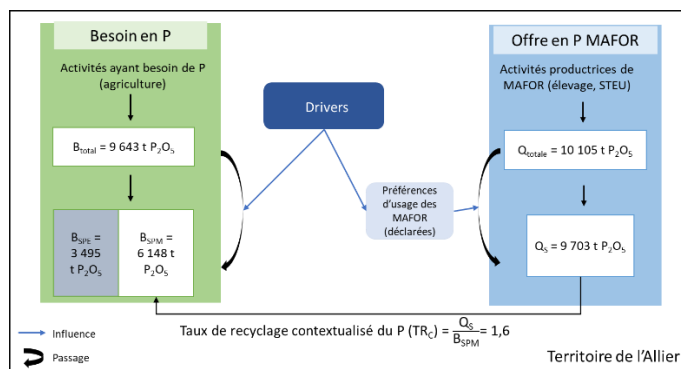


Figure 6. Synthèse des valeurs du modèle pour le cas du territoire de l'Allier (préférence déclarée)

## 2. Évaluation environnementale des scénarios de recyclage territorialisés

Les scénarios de recyclage territorialisés du projet RECYPEE ont été évalués avec la méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie (ACV), une méthodologie d'évaluation environnementale normée (ISO 14040) permettant d'évaluer un certain nombre d'impacts environnementaux potentiels sur l'ensemble du cycle de vie d'un système (produit, procédé ou filière). L'objectif de notre ACV était d'évaluer les impacts environnementaux des scénarios territorialisés de recyclage du P qui tiennent compte des besoins et du P issu des MAFOR disponibles localement dans le but de réduire la criticité du P à cette échelle en limitant l'usage des engrais minéraux phosphatés.

L'unité fonctionnelle choisie est de « répondre au besoin total en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (9 643 tonnes) des productions végétales du département de l'Allier ». Pour répondre à cette unité fonctionnelle, le système étudié prend en compte l'épandage des MAFOR et des engrais minéraux phosphatés. Les quantités de MAFOR épandues peuvent être comptabilisées comme un apport de P qui se substitue à des engrais minéraux phosphatés selon les préférences d'usages des agriculteurs et sont conditionnées par les restrictions réglementaires liées à leur épandage. Les frontières du système étudié ont été découpées en trois sous-systèmes : apport d'engrais minéraux incompressible, apport de MAFOR en substitution et épandage de MAFOR en surplus.

Le Sous-Système 1 (SS1) comprend l'ensemble des procédés relatifs à la production et l'épandage des engrais minéraux phosphatés utilisés afin de compléter les besoins en phosphore sur les parcelles ne pouvant pas recevoir de MAFOR (part fixe, SS1a) et les besoins en phosphore qui ne seraient pas couverts par les MAFOR épandues (part complémentaire, SS1b). Le Sous-Système 2 (SS2) comprend l'ensemble des procédés relatifs à la production et l'épandage des MAFOR dans un objectif de substitution des engrais minéraux. L'épandage est réalisé sur les surfaces pouvant recevoir des MAFOR (i.e. respectant les contraintes réglementaires). Le Sous-Système 3 (SS3) comprend l'ensemble des procédés relatifs à la production et l'épandage des MAFOR sans objectif de substitution des engrais minéraux. L'épandage est réalisé afin de gérer les excédents des MAFOR produites sur le territoire. Il n'est pas raisonné sur le besoin des cultures et donc leur épandage entraîne une sur-fertilisation des parcelles en phosphore.

Les scénarios territorialisés de recyclage du P ont été constitués sur la base des besoins en P des cultures et de l'offre de MAFOR sur le territoire de l'Allier. Quatre scénarios de recyclage territorialisés ont été évalués : un scénario basé sur les Préférences Déclarées (SPD) où les fumiers de volailles et une partie des fientes de volailles sont épandus en substitution aux engrais minéraux phosphatés et trois

scénarios basés sur les Préférences Révélées (SPRé) où respectivement boues de STEU, lisiers et fumiers de bovins, et lisiers et fumiers de porcs sont épandus en substitution aux engrais minéraux phosphatés (Figure 7).

L'évaluation des impacts environnementaux des scénarios est réalisée avec la méthode de caractérisation *Environmental Footprint* v3.1.

Les résultats sont considérés comme significativement différents à partir d'un seuil d'écart fixé à 20%.

Pour chaque catégorie d'impact, les résultats pour lesquels un écart entre scénarios est inférieur à 20 % ne sont pas considérés comme discriminants. Les résultats des impacts environnementaux des scénarios de recyclage territorialisés sont présentés dans la Figure 8.

Seuls les impacts pour lesquels les écarts entre les scénarios sont significatifs ont été représentés. Les impacts *Acidification*, *Eutrophisation des milieux aquatiques marins et terrestres*, *Particules Fines* et *Oxydation photochimique* présentent la même hiérarchie des scénarios que l'impact *Changement Climatique*. L'impact *Toxicité humaine* présente la même hiérarchie des scénarios que l'impact *Ecotoxicité des milieux aquatiques*. L'impact *Occupation des sols* présente la même hiérarchie des scénarios que l'impact *Radiations ionisantes*.

Comme attendu, les scénarios maximisant la substitution via l'épandage des MAFOR sont les scénarios qui ont les impacts environnementaux les plus faibles du fait qu'ils évitent l'usage d'engrais minéral phosphaté. L'analyse des contributions des différents types de MAFOR épandues en substitution aux engrais minéraux phosphatés montre que : 1) les quantités de matière sèche et de  $P_2O_5$  de MAFOR épandues sous forme solide (fumier) sont plus importantes que sous forme liquide et cela se retranscrit dans les résultats pour toutes les catégories d'impacts, sauf pour les effluents porcins où l'épandage est plus important sous forme de lisier que de fumier ; 2) bien qu'épandues en quantités équivalentes, les boues déshydratées chaulées ont un impact plus important que les boues pâteuses chaulées pour l'ensemble des catégories d'impact, excepté sur la consommation d'eau. Le choix des fumiers et fientes de volailles, déclarés par les agriculteurs comme étant les MAFOR qu'ils préféreraient pour la substitution des engrais minéraux, permet de drastiquement limiter les impacts environnementaux du fait de leur richesse en  $P_2O_5$ . A contrario, la détermination des MAFOR à privilégier selon un ensemble de critères issus des préférences d'usages révélées (valeur fertilisante, facilité d'épandage, absence d'adventices, présence d'ETM) n'a pas permis de construire un scénario

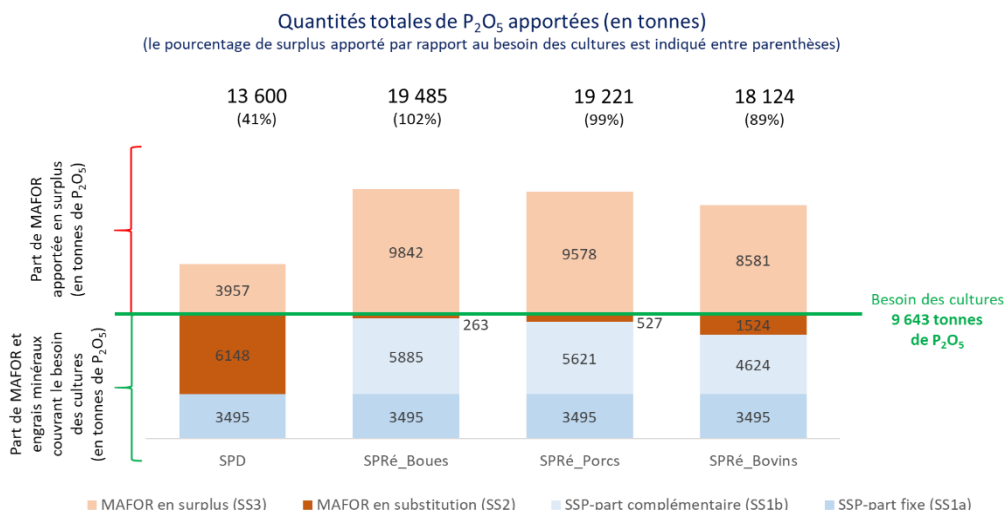


Figure 7. Synthèse des quantités de  $P_2O_5$  apportées sur le territoire pour chaque scénario territorialisé du recyclage du phosphore étudié

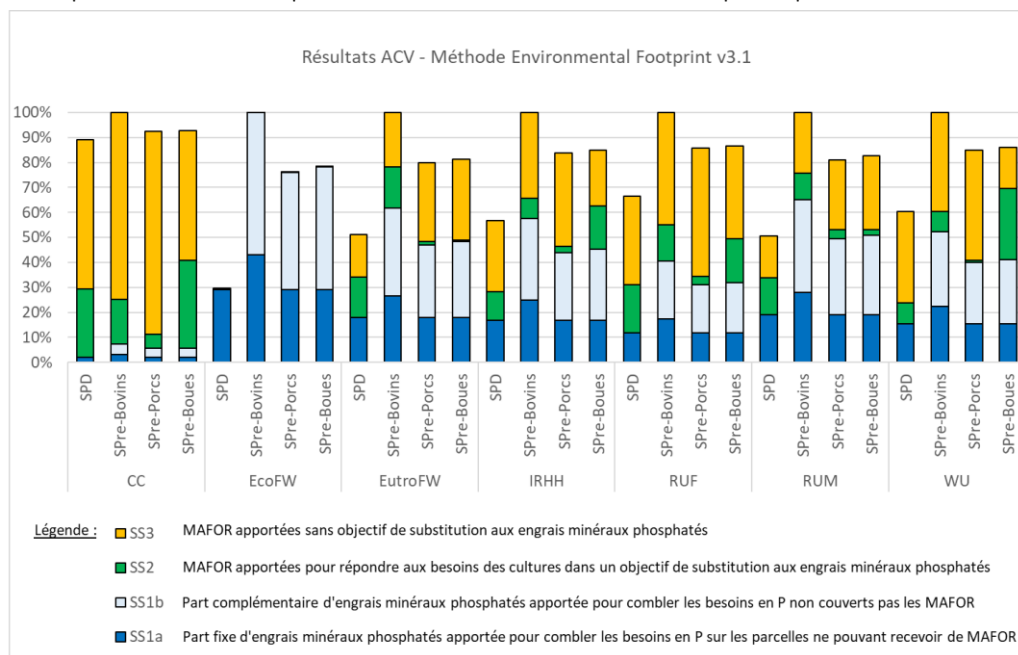


Figure 8. Contribution des différents sous-systèmes aux impacts environnementaux des scénarios de recyclage du phosphore incluant l'ensemble des MAFOR et engrais minéraux épandus sur le territoire (avec et sans objectif de substitution) (CC : Changement climatique, EcoFW : Écotoxicité des milieux aquatiques terrestres, EutroFW : Eutrophisation des milieux aquatiques, IRHH : Radiations ionisantes, RUF/RUM : Epuisement des ressources fossiles et minérales, WU : Consommation d'eau)

porcins où l'épandage est plus important sous forme de lisier que de fumier ; 2) bien qu'épandues en quantités équivalentes, les boues déshydratées chaulées ont un impact plus important que les boues pâteuses chaulées pour l'ensemble des catégories d'impact, excepté sur la consommation d'eau. Le choix des fumiers et fientes de volailles, déclarés par les agriculteurs comme étant les MAFOR qu'ils préféreraient pour la substitution des engrais minéraux, permet de drastiquement limiter les impacts environnementaux du fait de leur richesse en  $P_2O_5$ . A contrario, la détermination des MAFOR à privilégier selon un ensemble de critères issus des préférences d'usages révélées (valeur fertilisante, facilité d'épandage, absence d'adventices, présence d'ETM) n'a pas permis de construire un scénario

suffisamment pertinent pour substituer les engrais minéraux phosphatés. Les scénarios proposés ont donc exploré les différentes potentialités d'usage des MAFOR en substitution aux engrais minéraux et leurs conséquences environnementales en fonction des préférences d'usage révélées des agriculteurs en se focalisant uniquement sur un seul type de MAFOR et non pas un ensemble de MAFOR.

Au final, nous pouvons tirer de cette étude que la charge environnementale du territoire relative à l'activité de fertilisation augmente significativement en cas d'épandage excessif. En d'autres termes, l'avantage environnemental qui serait concédé par la substitution des engrais minéraux est dilué par l'épandage des MAFOR excédentaires si on se limite à leur seule fonction fertilisante phosphatée. Puisque le surdosage en P par l'apport des MAFOR est moins bien contrôlé, *de facto*, la problématique d'excès de P se pose dans les territoires avec un excédent de MAFOR, comme dans le cas du territoire de l'Allier.

### 3. Identification des déterminants techniques et socio-économiques de l'usage des MAFOR par les agriculteurs

#### 3.1. Qualité d'épandage des MAFOR et distribution des éléments fertilisants au sol par rapport aux racines des plantes

Hormis une analyse de la littérature scientifique portant sur la valeur fertilisante phosphatée des MAFOR, l'originalité du projet RECYPEE a porté sur la conception d'un simulateur permettant, à partir de mesures de la répartition transversale et longitudinale de l'épandage des MAFOR au banc d'essai et des nappes d'épandage générées, de visualiser les quantités de MAFOR épandues en surdosage et sous-dosage par rapport à une dose cible. Un premier simulateur a été développé en 2008 par l'UR TSCF pour estimer finement les performances d'apports des MAFOR à la parcelle et de comparer avec une grande précision différentes options de réalisation d'un chantier d'épandage. Toutefois, cet outil n'évalue que la répartition massique des MAFOR et non la distribution des éléments nutritifs au champ. Aussi, le nouveau simulateur développé dans le cadre du projet RECYPEE reprend le même principe et introduit : (i) des variabilités sur le débit instantané et les quantités apportées avec la nappe ; (ii) des teneurs en éléments fertilisants et des variabilités associées ; (iii) la distribution massique suivant leur taille des éléments épandus au sol et (iv) une estimation des distances racine / particule d'apport de MAFOR.

Le simulateur d'épandage reproduit le fonctionnement d'un épandeur dans une parcelle en distribuant des quantités de matières fertilisantes le long d'une trajectoire. Les quantités délivrées localement sont ainsi le reflet des paramètres de réglage machine (vitesse d'avancement, débit massique, largeur de travail). La variabilité liée à ces paramètres a par ailleurs été implémentée dans cette version de simulateur, en particulier en ce qui concerne le débit massique et les apports associés en éléments N, P et K. Le résultat fourni en sortie est une matrice de doses fertilisantes du produit épandu, en kg/m<sup>2</sup>. Des exemples de sorties du simulateur sont présentés respectivement en Figure 9 pour du fumier et en Figure 10 pour de la struvite. Ces deux exemples, très contrastés, restent en cohérence avec les produits utilisés et les aptitudes de réglages des machines. Ils mettent en évidence des hétérogénéités d'épandage en fonction de la MAFOR utilisée. Ainsi, l'épandage à la parcelle le plus hétérogène est obtenu avec le fumier de bovins (plage de dose [60% – 180%] de la moyenne) tandis que la répartition la plus homogène est produite avec la struvite (plage de dose [85% – 125%] de la moyenne).

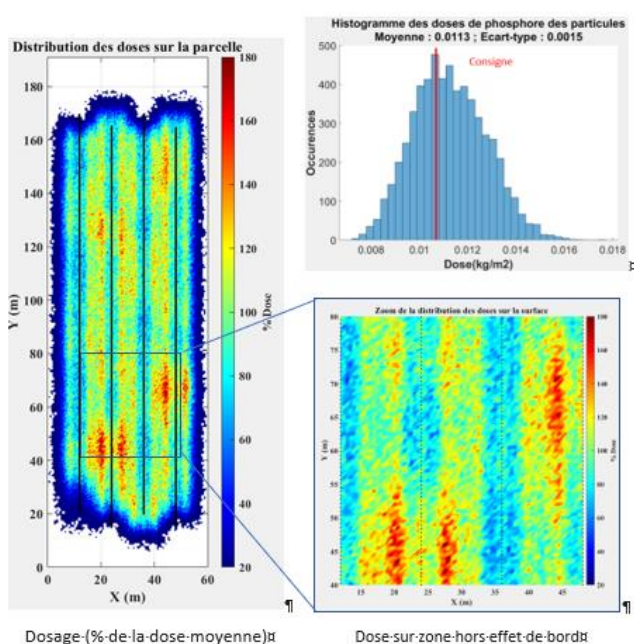
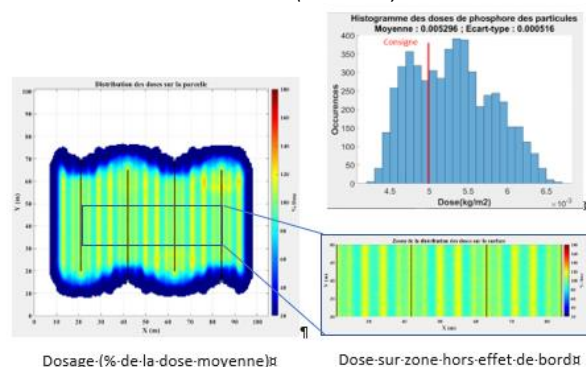


Figure 9. Visuels de la répartition relative des doses sur une parcelle théorique et histogramme des doses de répartition du phosphore pour le fumier (à gauche)

Figure 10. Visuels de la répartition relative des doses sur une parcelle théorique et histogramme des doses de répartition du phosphore pour la struvite (ci-dessous)



Les matrices générées lors de chaque simulation (doses brutes du fertilisant, doses d'azote, de phosphore et de potassium associées) sont très représentatives des réalités de terrain pour les quantités délivrées localement. La méthode permet l'évaluation des performances d'un épandeur et de ses équipements de maîtrise de dose et elle rend compte avec une finesse suffisante des variabilités locales engendrées par l'interaction de celles dues à l'épandeur et au produit épandu. Cependant, à l'échelle de la plante et de son système racinaire, l'information moyennée par m<sup>2</sup> ne suffit pas. Les informations de localisations exactes de chaque particule de fertilisant épandue lors du process suivi par le simulateur sont ainsi enregistrées, au lieu d'être simplement additionnées à leur maille carrée d'appartenance. Une représentation cartographique de cette distribution des localisations d'éléments fertilisants dans la parcelle est générée, puis une fonction spéciale réalise un tirage aléatoire de 5 000 positions géographiques hypothétiques de racines. Une distribution statistique de ces distances [racine / élément fertilisant] est ainsi calculée et représentée de deux manières différentes, en noir, la courbe de distribution simple, en bleu celle cumulée croissante. Cette dernière permet une interprétation plus rapide, avec la possibilité d'extraire visuellement des ordres de grandeur, tels que la médiane ou le quintile supérieur.

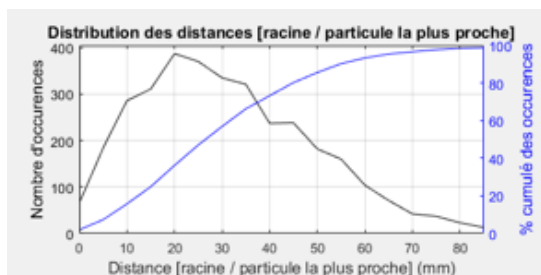


Figure 11. Distribution des distances [racine / particule la plus proche] pour le fumier

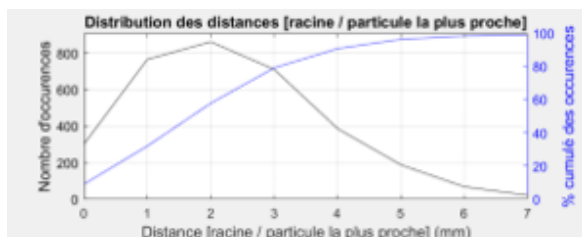


Figure 12. Distribution des distances [racine / particule la plus proche] pour la struvite

Pour le fumier, la distribution des distances [racine / particule MAFOR la plus proche] disperse jusqu'à plus de 80mm avec une médiane de distance de l'ordre de 27mm et plus de 20% des cas à plus de 45mm (Figure 11).

Dans ces conditions, la valorisation agronomique par les plantes des éléments nutritifs apportés est plus difficile, que ce soit pour l'azote (40% seulement des distances [racine / Particule MAFOR] sont inférieures à 20mm, distance de valorisation considérée) ou pour le phosphore (moins de 5% des distances inférieures à 2,5mm).

Pour la struvite, la distribution des distances [racines / Particules MAFOR] illustre la très bonne aptitude de ce produit à mettre à disposition des plantes les éléments nutritifs (Figure 12).

En effet, la courbe disperse jusqu'à la limite supérieure de 7mm, avec une médiane à moins de 2mm. Ainsi, pour l'azote, ce sont 100% des cas de figure pour lesquels la plante tirera partie des apports, et pour le phosphore, dans presque 80% des cas de figure, la distance est compatible avec une valorisation possible.

L'ajout dans le simulateur de la sous-fonction permettant le calcul des distances [racines / Particules MAFOR] permet une véritable analyse au niveau agronomique de la valorisation potentiellement réalisable par les plantes des unités fertilisantes apportées, par élément et type de fertilisant. Les trois cas de figure de MAFOR utilisés illustrent les gains successifs qui sont obtenus dans ce cadre lorsque l'on progresse de produits bruts (fumier) vers des produits homogénéisés (compost de fumier) puis vers des produits transformés (struvite). Pour le P, par exemple, seule l'utilisation de la struvite s'avère produire une distribution finale avec des distances [racines / Particules de MAFOR] compatible pour valorisation. Le cas de l'azote est moins critique et permet a priori une bonne valorisation dans tous les cas, même si celle du fumier n'est pas toujours assurée. Il convient cependant de relativiser ces résultats au regard de la densité racinaire qui n'est actuellement pas prise en compte dans le simulateur.

## 3.2. Déterminants socio-économiques de l'usage des MAFOR par les agriculteurs

L'identification des déterminants socio-économiques de l'usage des MAFOR par les agriculteurs s'est organisée autour de deux études. La première étude a cherché à analyser, à identifier et à comprendre le choix d'achat et d'utilisation des MAFOR par les agriculteurs. Elle a été conduite sur la base d'enquêtes semi-directives auprès de 25 agriculteurs des Hauts-de-France à partir du questionnaire commun utilisé pour enquêter les agriculteurs de l'Allier. La seconde étude s'est focalisée plus spécifiquement sur les modes d'organisation et d'intermédiation du marché des MAFOR. Elle a également été conduite sur la base d'enquêtes semi-directives dédiées à l'évaluation des modes d'organisation et d'intermédiation du marché des MAFOR auprès d'agriculteurs utilisant des MAFOR, des acteurs institutionnels (chambres d'agriculture, services techniques tels que SATEGE et MUAD, institutions de recherche, directions départementales telles que la DREAL, la DDT,...) et des acteurs des filières (composteurs, méthaniseurs, STEU).

### 3.2.1. Comprendre les comportements d'achat et d'utilisation des MAFOR par les agriculteurs

Les composantes qui permettent de mieux comprendre les comportements des agriculteurs vis-à-vis des MAFOR peuvent se classer en quatre catégories :

- la **dimension économique** : les aspects économiques identifiés sont l'attractivité des coûts et les inégalités économiques. Les MAFOR, en tant qu'alternatives aux engrais de synthèse, séduisent en raison de leur faible coût, parfois nul, permettant aux

agriculteurs de réaliser des économies. A contrario, les agriculteurs proches des centres urbains ou avec des infrastructures adaptées ont un accès plus facile aux MAFOR, tandis que les exploitants éloignés ou à faibles revenus rencontrent des difficultés d'approvisionnement. Un fossé se creuse donc entre les grandes exploitations et les exploitations plus modestes, renforçant les inégalités d'accès aux MAFOR.

- la **question environnementale** : les enjeux environnementaux associés à l'épandage des MAFOR sont les risques de pollution des sols et des eaux (nitrates et ruissellement d'effluents polluants), les émissions atmosphériques (ammoniac, protoxyde d'azote contribuant au changement climatique) et la santé des sols (impact long terme des composés pathogènes et traces métalliques sur la fertilité et la biodiversité des sols). Les agriculteurs interrogés ont montré une réelle sensibilité aux questions environnementales et climatiques, d'autant plus qu'ils exercent un métier qui est au cœur de ces enjeux.
- la **notion d'acceptabilité sociale** qui inclut la méfiance des riverains (nuisances olfactives et peur des risques sanitaires) et la fragmentation sociale (stigmatisation des agriculteurs utilisant les MAFOR, notamment par les consommateurs ou les organisations environnementales). Ces éléments renforcent l'importance de la pédagogie et le besoin d'une meilleure communication sur les bénéfices/risques associés aux MAFOR.
- le **cadre réglementaire** en lien avec la complexité des normes (vues comme des réglementations strictes et parfois incohérentes) qui ne sont pas suffisamment encadrées (application mal adaptée aux spécificités locales).

L'étude a également mis en exergue un point important pour les agriculteurs qui est celui de la responsabilité partagée. En tant qu'utilisateurs finaux, les agriculteurs sont en première ligne pour gérer les impacts des MAFOR. Cependant, ils dépendent largement des informations fournies par les producteurs sur les propriétés des MAFOR utilisées. Une meilleure collaboration est donc indispensable, avec une coordination entre producteurs, agriculteurs, décideurs politiques et scientifiques, pour lever les freins à l'adoption des MAFOR et maximiser leurs bénéfices pour l'ensemble des acteurs du territoire.

Au final, quelques conclusions générales et des recommandations peuvent être tirées de cette première étude. Les aspects économiques de l'usage des MAFOR sont aujourd'hui une source d'inquiétude majeure pour les agriculteurs, et l'incertitude sur l'évolution d'un marché instable ne fait que renforcer la difficulté à se projeter. Les inégalités d'accessibilités représentent un enjeu conséquent, notamment dans les régions comme la région Haut-de-France où l'élevage se fait de plus en plus rare, et où par conséquent les quantités d'effluents d'élevage diminuent. Si les agriculteurs ont la volonté d'utiliser des MAFOR en remplacement des engrais minéraux, beaucoup d'efforts sont à faire pour que leur usage représente une économie circulaire efficace. L'usage des MAFOR implique également le respect de réglementations environnementales et sanitaires qui ne sont pas toujours claires et cohérentes selon les agriculteurs enquêtés, et pouvant mener à l'abandon de leur utilisation.

Enfin, l'opinion publique peut jouer un rôle dans l'usage des MAFOR. Les habitants peuvent avoir une vision négative des agriculteurs, appuyée par les médias, et les agriculteurs accusent les « néoruraux » d'envahir les campagnes. Le dialogue peut alors sembler difficile du fait de la méconnaissance des différents enjeux et la remise en dialogue s'appuyant sur des approches pédagogiques pourrait être envisagée.

### **3.2.2. Identifier les différentes formes d'échanges des matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) en Hauts-de-France**

La seconde étude a permis de développer une typologie des formes d'échanges et de recommander des stratégies pour renforcer l'usage des MAFOR dans un cadre territorial spécifique. L'étude a mis en évidence trois modalités d'échanges de MAFOR : (i) les échanges directs, tels que le troc entre agriculteurs et éleveurs (par exemple, paille contre lisier ou CIVE contre digestat), (ii) la vente commerciale des produits normés (composts ou digestats) et (iii) les plateformes collectives et notamment numériques, facilitant la mise en relation entre producteurs et utilisateurs.

L'évolution de la terminologie des MAFOR (de « déchets » à « produits recyclés ») et une meilleure communication sur leurs caractéristiques pourraient renforcer leur adoption. L'étude a permis ainsi de définir trois catégories d'utilisateurs de MAFOR : (i) non-utilisateurs qui rejettent les MAFOR en raison d'avis négatifs ou de contraintes techniques, (ii) les opportunistes qui utilisent ponctuellement en fonction des besoins ou des opportunités locales et (iii) les utilisateurs systématiques qui valorisent régulièrement les MAFOR pour leur efficacité agronomique et leur accessibilité. La valorisation des MAFOR dépend d'une mobilisation coordonnée des acteurs, d'une évolution des perceptions et d'un cadre réglementaire adapté. En favorisant une approche territorialisée et en levant les freins existants, les Hauts-de-France pourraient devenir un modèle en matière de gestion des fertilisants issus de matières résiduares, notamment par le fait qu'elle dispose d'un fort potentiel de matières valorisables sous forme de compost et digestat, créant un marché dynamique assez structuré qui fait intervenir des acteurs internes comme externes.

Le marché interne fait intervenir des acteurs de plusieurs niveaux : (i) les institutions qui, à travers la réglementation en vigueur, essaient d'encadrer l'usage ; (ii) les acteurs des filières qui constituent des intermédiaires nécessaires pour les résidus produits par les industries agroalimentaires ; (iii) les collectivités et les agriculteurs qui sont à la fois producteurs et utilisateurs de MAFOR, et (iv) les STEU qui sont productrices de MAFOR. Cet intérêt pour les MAFOR se démontre aussi par l'engouement observé autour d'elles. Il s'est ainsi créé

plusieurs entreprises de négociants ou commerciaux de produits résiduaux pour alimenter les unités de méthanisation et les plateformes de compostage. Il existe également des commerciaux des sociétés intermédiaires qui proposent le compost ou le digestat de méthanisation aux agriculteurs comme fertilisants, de même on note la présence d'entreprises d'épandage, qui se multiplient.

Des contrats entre certaines unités de méthanisation et des agriculteurs permettent d'officialiser une collaboration basée sur des échanges de matières. Des éleveurs fournissent des effluents d'élevage à des entreprises de méthanisation qui, en retour, prennent en charge l'épandage du digestat sur des parcelles indiquées par l'agriculteur. Il s'agit de relations sociogéographiques car elles sont influencées par des liens d'amitiés, de familles et la proximité géographique.

Pour bénéficier de l'épandage, il faut être dans le plan d'épandage de l'unité de méthanisation ou de la plateforme de compostage. L'épandage est assuré par le responsable de la plateforme qui assure aussi les analyses agronomiques prévues par la réglementation. Il existe aussi des contrats de vente du digestat établis à des montants fixés entre les deux parties. Des entreprises de vente de matières résiduaux ont vu le jour, mais pour être plus autonomes, elles ont développé des plateformes de compostage et de méthanisation et continuent de fournir d'autres plateformes. L'arrivée de grosses entreprises sur le marché des MAFOR (industriels de la transformation, municipalités, voire coopératives) sème le trouble dans le rang des acteurs historiques de la filière et même de certains acteurs institutionnels et questionne le devenir du marché dans les années à venir. Dans le même temps, les entreprises majeures concernées s'interrogent aussi sur le futur de ce marché. Néanmoins, ce marché est en pleine expansion et on peut prévoir une forte consolidation à moyen terme. Les différents acteurs de ce marché sont tous en attente du socle commun réglementaire qui permettra pour certains d'homogénéiser les pratiques et favorisera la consolidation du marché et pour d'autres, conduira à une limitation de l'utilisation de MAFOR.

## 4. Freins et leviers pour le recyclage du P issu des MAFOR

À partir de cette analyse, il a été possible d'identifier des freins et leviers pour le recyclage du P issu des MAFOR à l'échelle des territoires. Certains de ces freins et leviers avaient déjà été identifiés dans d'autres études, comme la complexité réglementaire et le manque de clarté dans la définition de responsabilités légales, le manque de confiance des agriculteurs dans la valeur fertilisante phosphatée des MAFOR, les inquiétudes au sujet des contaminants, les coûts et difficultés logistiques de la collecte et du recyclage, incluant l'éloignement géographique et le transport. Les freins et leviers, présentés ci-après dans le Tableau 1, sont ceux qui découlent directement des résultats du projet RECYPEE (enquêtes menées dans l'Allier et les Hauts-de-France, essais sur la qualité d'épandage, résultats ACV...) et ne prennent pas en compte les freins et leviers qui ont été identifiés dans la littérature mentionnée ci-dessus.

Tableau 1. Freins et leviers pour le recyclage du P issu des MAFOR à l'échelle des territoires mis en avant dans le projet RECYPEE

Quels types de freins ?	Quels leviers associés ?	Par quels acteurs ?
Raisonnement de la fertilisation majoritairement sur l'azote	Sensibiliser les agriculteurs au risque de sur ou sous-dosage du P si raisonnement de la fertilisation uniquement sur l'azote ou si épandages de MAFOR systématisés et non en adéquation avec les besoins en P des cultures	Chambres d'Agriculture, Instituts techniques
	Apporter des connaissances sur le couplage des cycles N et P	Instituts de recherche
Absence de stratégies de fertilisation phosphatée avec des MAFOR à l'échelle des territoires	Comprendre et analyser les stratégies existantes sur les différents territoires français	Instituts de recherche
	Apporter des connaissances sur les stratégies et pratiques possibles de fertilisation phosphatée avec des MAFOR	Instituts de recherche
	Structurer des filières de recyclage des MAFOR à l'échelle des territoires	Chambres d'Agriculture, Instituts techniques, Instituts de recherche
Inégalités d'accès aux MAFOR par les agriculteurs	Outils les territoires pour faciliter les échanges entre producteurs et non producteurs de MAFOR	Chambres d'Agriculture, Associations agricoles, Collectivités territoriales, Professionnels de l'épandage
	Explorer le potentiel de marchés dédiés aux MAFOR	
Complexité des normes et des réglementations	Définir une réglementation plus claire et intégrant les nouveaux usages des MAFOR	Pouvoirs publics, Collectivités territoriales
Méfiance des riverains et de certains agriculteurs vis-à-vis de l'épandage des MAFOR	Communiquer de manière transparente sur les bénéfices et les risques associés à l'épandage des MAFOR	Pouvoirs publics, Collectivités territoriales, Chambres d'Agriculture
	Mettre en place des espaces de concertation entre utilisateurs de MAFOR et grand public	Pouvoirs publics, Collectivités territoriales, Chambres d'Agriculture
	Mettre en place des espaces de concertation entre agriculteurs utilisateurs et non utilisateurs de MAFOR	Chambres d'Agriculture, Syndicats agricoles

## RÉSUMÉ

Le Phosphore (P) issu des matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) a une valeur fertilisante équivalente à celle des engrais phosphatés naturels et son recyclage permettrait de réduire la pression sur la ressource P non renouvelable issue des roches phosphatées. Évaluer finement ce potentiel de substitution nécessite d'identifier des stratégies de recyclage adaptées aux besoins et à la disponibilité du P à l'échelle des territoires selon des approches techniques, socio-économiques et environnementales pertinentes. Ce travail s'est appuyé sur deux territoires d'études, le département de l'Allier en région Auvergne-Rhône-Alpes et la région des Hauts-de-France.

Le projet RECYPEE a eu pour objectif d'identifier les leviers aux verrous scientifiques et techniques liés à la mise en place de ces stratégies en apportant des connaissances sur le potentiel de recyclage du P issu des MAFOR en fonction des territoires, sur les facteurs déterminants l'usage du P issu des MAFOR par les agriculteurs, et sur l'amélioration des méthodes d'évaluation environnementale de type ACV pour mesurer l'incidence du recyclage sur la réduction de la criticité des ressources.

Le projet RECYPEE a produit une analyse technique, socio-économique et environnementale du recyclage du P à partir des MAFOR au travers du développement d'un modèle conceptuel de recyclage contextualisé du P, de l'évaluation des impacts environnementaux potentiels des scénarios territorialisés du recyclage du P et de l'identification des déterminants techniques et socio-économiques contribuant ou non à l'utilisation des MAFOR par les agriculteurs. À partir de cette analyse, il a été possible d'identifier des freins et leviers pour le recyclage du P issu des MAFOR à l'échelle des territoires.

### Ce document est diffusé par l'ADEME

#### ADEME

20, avenue du Grésillé  
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 20-03-C0033

Projet de recherche coordonné par : Marilyns Pradel, INRAE – UR TSCF

Appel à projet de recherche : GRAINE2019

Coordination technique - ADEME : Rullier Sylvain, ingénieur thématique sol – agriculture – climat

Direction/Service : DBER – Agriculture Forêts et Alimentation (SAFA)

### CITATION DE CE RAPPORT

PRADEL Marilyns, AISSANI Lynda, THIRIET Pierre, PIRON Emmanuel, SAUVEE Loïc. 2025. Impact du RECYclage du phosphore (P) à partir de biomasse résiduaire pour la production de fertilisants déchet-sourcés : potentialités techniques, Economiques et Environnementales – Synthèse du projet RECYPEE. 10 pages

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.