

# Les stocks de phosphore dans les sols agricoles : origine et devenir

Julia Le Noë<sup>1\*</sup>, Gilles Billen<sup>1</sup>, Nicolas Roux<sup>1</sup>, Josette Garnier<sup>1</sup>,  
Vincent Thieu<sup>1</sup>, Marie Silvestre<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne-Université/CNRS, UMR Metis

\* julia.lenoe@gmail.com

## **Résumé**

*On peut distinguer 3 phases dans l'histoire de l'agriculture française depuis le milieu du XIXe siècle. Jusqu'à la seconde guerre mondiale, le système de polyculture-élevage et de fertilisation organique des terres arables domine partout, avec seulement un très faible recours aux engrais de synthèse notamment phosphorés. L'usage de ceux-ci explose de 1950 à 1980, conduisant à l'accumulation de stocks de phosphore hérités, qui peuvent représenter, dans certaines régions, jusqu'à 80% du stock de phosphore présent aujourd'hui dans les 30 premiers cm des terres arables. L'analyse des circuits d'approvisionnement de l'industrie française des engrais permet de définir l'origine géographique de ces apports, et ainsi de mieux cerner la dette écologique contractée par la France vis-à-vis des pays d'où a été extraite cette ressource non renouvelable.*

## **Points clefs**

- ✓ *La période 1950-1980 s'est caractérisée en France par une utilisation massivement excédentaire de fertilisants phosphorés minéraux.*
- ✓ *Ces excédents ont constitué dans les sols arables des stocks de phosphore hérités représentant jusqu'à 80% du contenu en phosphore actuel des sols.*
- ✓ *Ces stocks hérités constituent une dette écologique vis-à-vis des pays d'où ils proviennent, principalement le Maroc, le Moyen-Orient et l'Afrique sub-saharienne.*

## **Introduction**

Bien que son cycle soit très différent de celui de l'azote puisqu'il n'a pas de forme gazeuse et que son insolubilité réduit fortement sa mobilité hydrique, le phosphore a connu une histoire biogéochimique assez similaire à celle de l'azote. Élément constitutif de l'ADN, de l'ATP et des phospholipides, le phosphore est lui aussi indispensable à la vie. Comme pour l'azote, ce sont les plantes qui font entrer le phosphore dans le cycle biogéochimique terrestre par l'assimilation des ions phosphates présents dans la solution du sol, tandis que les processus hétérotrophes de décomposition de la matière organique restituent au sol le phosphore minéral. Cette complémentarité des métabolismes autotrophes et hétérotrophes constitue l'essentiel du cycle du phosphore dans l'agriculture pré-industrielle, un cycle quasiment fermé, avec cependant des pertes de phosphore des sols, essentiellement par érosion, compensées par la lente dissolution du phosphore contenu dans la roche mère lors de la pédogenèse (Figure 1a).

La découverte au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle du guano, excréments d'oiseaux fossilisés dans les îles du pacifique, puis la découverte de gisements fossiles sous forme de roche riche en phosphates a permis d'augmenter la production des cultures, et a rendu obsolète la nécessité du recyclage du phosphore contenu dans les fumiers d'élevage, engendrant ainsi une agriculture à cycle ouvert (Figure 1b). Néanmoins, les gisements fossiles ne sont pas illimités. Et bien que les ressources soient encore considérables (Elser and Benett, 2011), mais très inégalement réparties à la surface de la planète, l'ouverture du cycle du phosphore conduit inexorablement à la perte du phosphore dans les océans où le phosphore est infiniment dilué et où les

stocks de phosphore mettront ensuite des centaines de milliers d'années à se reconstituer. En outre, comme pour l'azote, l'accroissement de phosphore apporté aux sols agricoles conduit à des pertes importantes vers les hydrosystèmes causant un phénomène d'eutrophisation des eaux de surface. La perturbation induite par cette ouverture du cycle du phosphore à l'échelle globale est considérée par Steffen et al (2015) comme dépassant les limites soutenables du fonctionnement planétaire (Figure 1c).

Cette vision d'ensemble, si elle pose le problème de la soutenabilité de la gestion du phosphore dans les systèmes agricoles, ne permet cependant pas d'appréhender les enjeux locaux liés aux trajectoires particulières des territoires où sont pratiquées les activités agricoles. L'avantage de l'échelle du territoire par rapport à d'autres échelles macroscopiques est qu'elle permet de considérer ensemble les conditions biophysiques d'un espace géographique donné (p.ex., les conditions pédo-climatiques) et les aspects socio-économiques qui régissent ou contraignent les activités agricoles à l'échelle du territoire (p.ex., densité de population, zone portuaire) mais s'intégrant dans un contexte politico-économique plus large (p.ex., les politiques agricoles, l'organisation des chaînes de production et de distribution agro-alimentaire).

Dans le présent rapport, nous nous proposons donc de questionner les enjeux de durabilité liés à la gestion du phosphore dans les systèmes agricoles dans les territoires français depuis 1852 jusqu'à 2014. Les questions scientifiques auxquelles nous tentons de répondre sont les suivantes : (i) comment la gestion des ressources en phosphore dans les territoires agricoles français a-t-elle évolué depuis 1852 ? (ii) quels héritages en phosphore dans les terres arables ont résulté de ces différentes trajectoires ? (iii) d'où proviennent ces stocks de phosphore accumulés dans les terres arables ?

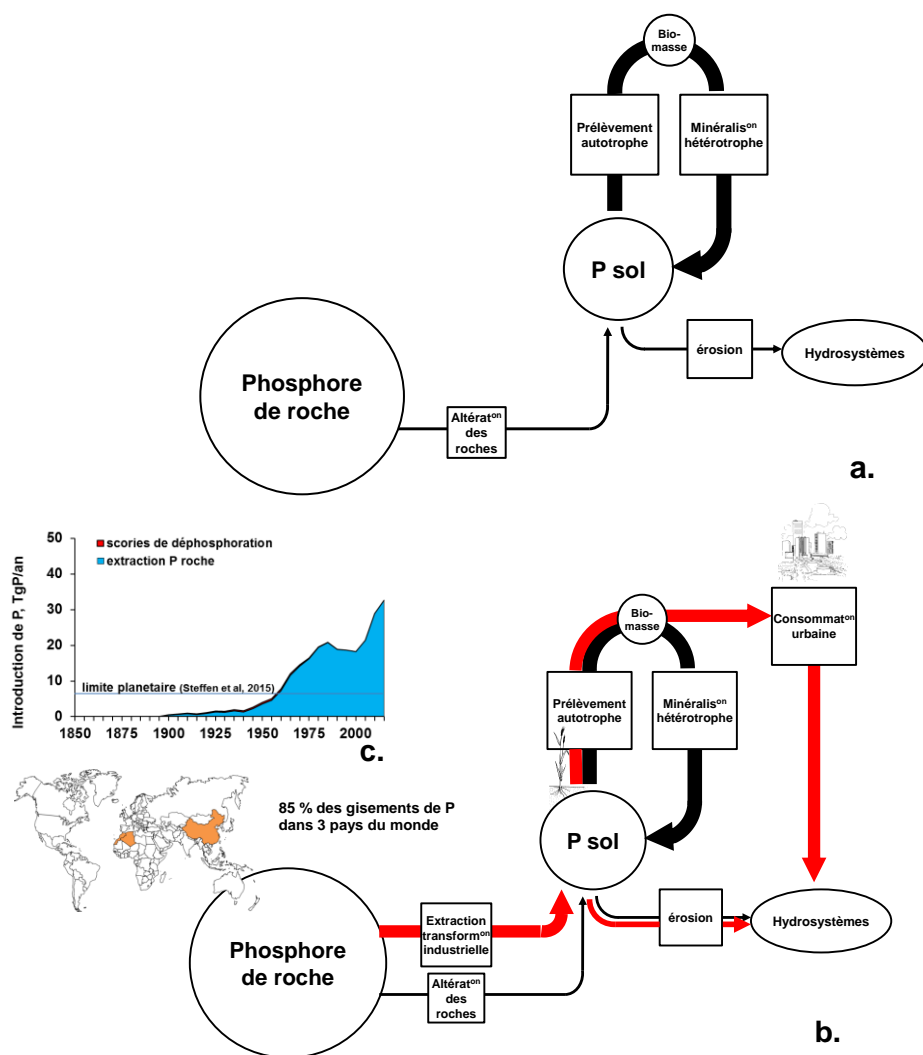


Figure 1. a. Le cycle relativement fermé du phosphore à l'époque pré-industrielle. b. Le cycle ouvert du phosphore induit par la déconnexion de la production agricole et de la consommation, et la substitution du recyclage des fumiers par le recours à des ressources minières. c. Croissance des extractions minières de P à l'échelle mondiale.

## 1. Le bilan phosphore des terres arables en France

### 1.1. Les phases de la fertilisation phosphorée

L'approche GRAFS appliquée à l'échelle de 33 régions françaises de 1852 à 2014 (Le Noë et al., 2018) permet de retracer l'évolution de la fertilisation en phosphore des terres agricoles françaises (Figure 2). Longtemps, les excréments animaux (et humains) ont constitué, dans le cadre d'un système de polyculture-élevage dominant, le seul mode de fertilisation des terres arables, tout juste bon à compenser, souvent de manière imparfaite, les pertes inévitables de phosphore liés à l'exportation de la récolte.

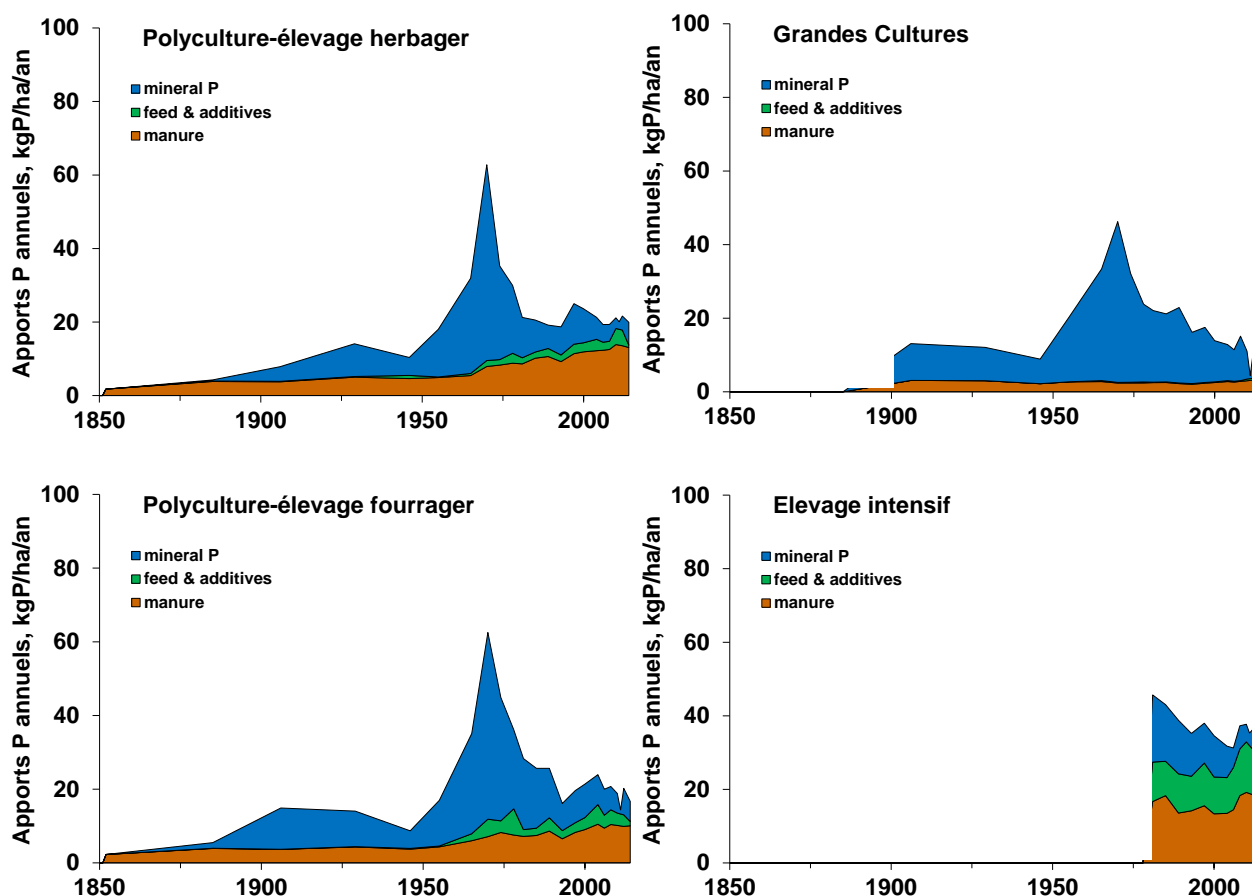


Figure 2. Evolution de la nature des apports de P aux terres arables dans les 4 principaux types de systèmes agricoles français tels qu'identifiés par Le Noë et al, (2018). Les systèmes Grandes cultures et élevage intensif n'existent en tant que tels que depuis 1900 et 1980, respectivement.

Vers la fin du XIXe siècle, l'usage du guano, puis des roches phosphatées, d'abord brutes, puis traitées par l'acide sulfurique pour accroître leur solubilité (super phosphates), devient une pratique courante en Europe mais son usage reste limité en France. En France, le tournant du passage d'une agriculture fonctionnant sur le mode de la polyculture-élevage à une agriculture beaucoup plus intensive et qui se spécialise dans certaines régions va s'observer à la sortie de la seconde guerre mondiale et cette tendance se renforce véritablement à partir du milieu des années 50. Dans la période allant de 1955 à 1975, on assiste à une « Grande Accélération » de la production agricole et de la « modernisation » de l'agriculture Française impulsée à la fois par les politiques publiques de l'Etat et de l'Europe mais aussi par une frange organisée de la nouvelle génération des agriculteurs. La fertilisation phosphorée prend alors une ampleur inégalée.

La période post-chocs pétroliers, depuis les années 1980, voit se réduire considérablement la fertilisation phosphorée minérale.

## 1.2. Le bilan P des terres arables

Le bilan phosphore des sols arables (différence entre les apports de P au sol et les sorties liées à l'exportation par la récolte) (Figure 3) sont souvent négatifs au début du XIXe siècle, malgré un transfert de fertilité depuis les prairies permanentes à travers les déjections animales issues du pâturage. Ils deviennent positifs avec l'introduction de la fertilisation minérale. La période des « Trente Glorieuses » conduit à des bilans phosphore très largement excédentaires. Ces bilans diminuent fortement à partir des années 1980 et deviennent même négatifs dans beaucoup de régions de grande culture (Figure 4).

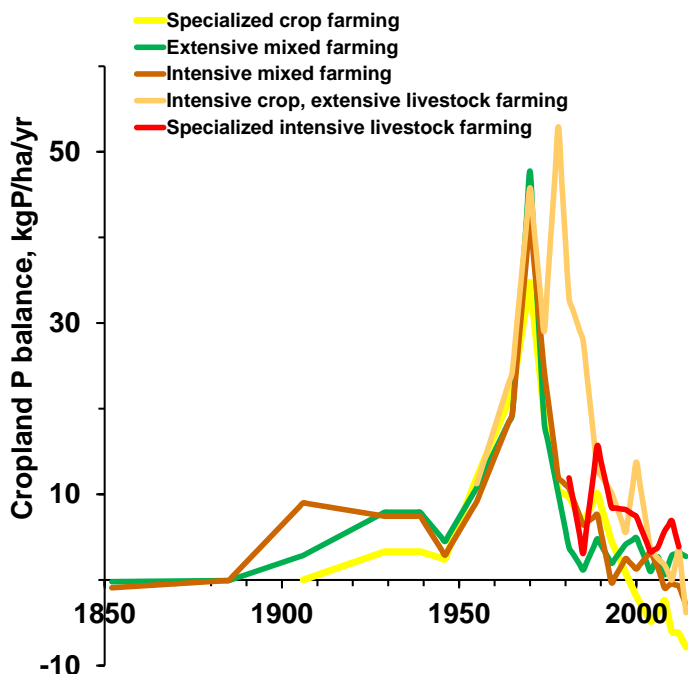


Figure 3. Evolution du bilan P des terres arables des différents types de systèmes agricoles (selon la typologie biogéochimique, Le Noë et al., 2018).

### Terres arables

### Prairies permanentes

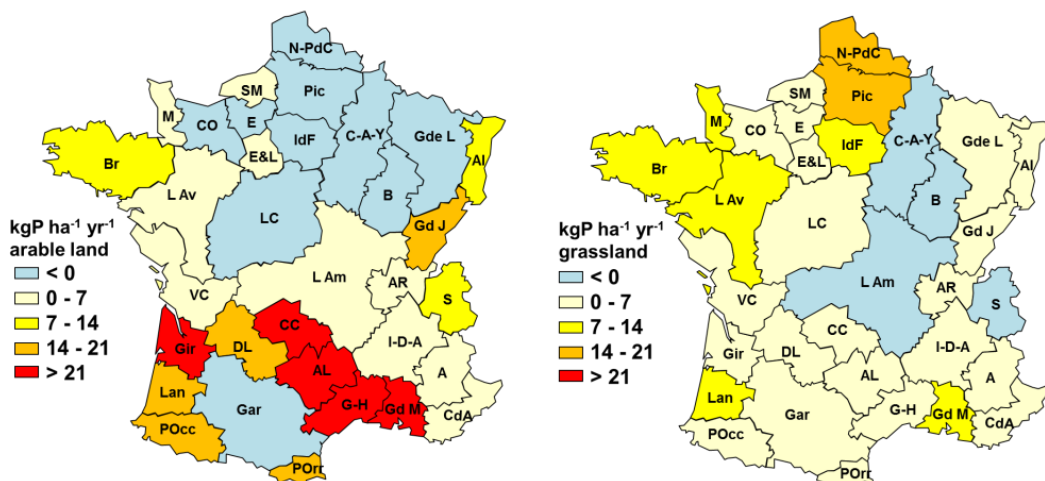


Figure 4. Distribution géographique du bilan phosphore des terres arables et des prairies en 2006 (Le Noë et al., 2017)

## 2. Constitution des stocks de phosphore dans les sols arables

A cause de la faible mobilité de cet élément, les bilans de phosphore des sols peuvent conduire sur le long terme à une modification significative du stock total présent. Le seul mécanisme qui interfère avec ce processus est l'érosion des sols, particulièrement importante en ce qui concerne les sols arables.

### 2.1. L'érosion des sols

Jusqu'ici, les travaux disponibles sur l'érosion des sols évaluait l'érosion brute (par ex., Cerdan, 2010) qui conduit souvent à une redistribution du matériel érodé à l'échelle du paysage, sans exportation réelle vers l'hydrosystème. Le passage par la calibration d'un « sediment delivery ratio », rapport entre la charge sédimentaire exportée par les cours d'eau et l'érosion brute du bassin versant (Delmas et al., 2009) était alors nécessaire pour évaluer, encore qu'avec beaucoup d'incertitude, l'érosion nette. Le modèle WATEM/SEDEM de Borelli et al. (2018) fournit pour la première fois des données de flux érosifs nets moyens pluriannuels finement spatialisés à l'échelle européenne. L'intégration de ces flux par bassins versants élémentaires a permis d'estimer un flux total d'apport de matériel érodé au réseau hydrographique, et partant, un taux d'érosion nette des terres arables par région agricole (Figure 5).

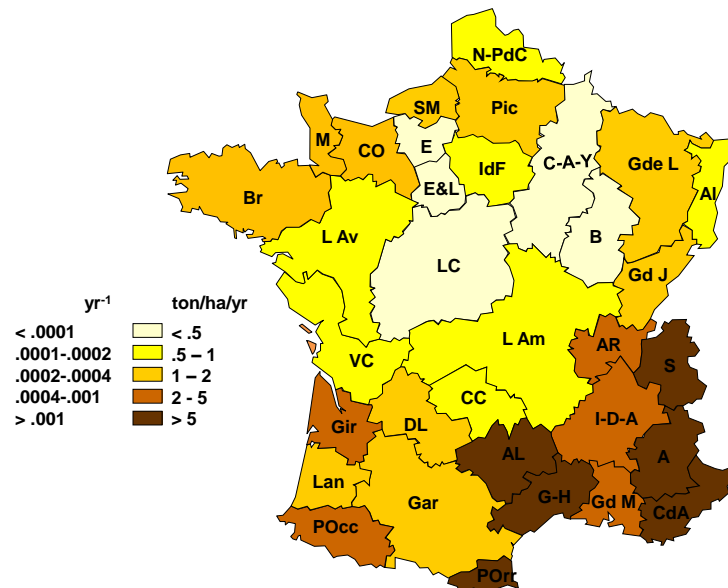


Figure 5. Taux d'érosion nette des terres arables par région agricole, selon les données de Borelli et al (2018). Les taux d'érosion moyens annuels sont exprimés en fraction du stock de terre dans les premiers 30 cm de profondeur.

### 2.2. Bilans phosphore cumulés des sols arables

L'estimation des bilans annuels des apports et des sorties de phosphore et des taux d'érosion nette à l'échelle régionale permet de calculer les bilans cumulés du phosphore ajouté au stock des sols arables, corrigés des pertes par érosion au cours de la période 1850-2014. La figure 6 montre le résultat de ce calcul pour le bassin de la Seine.

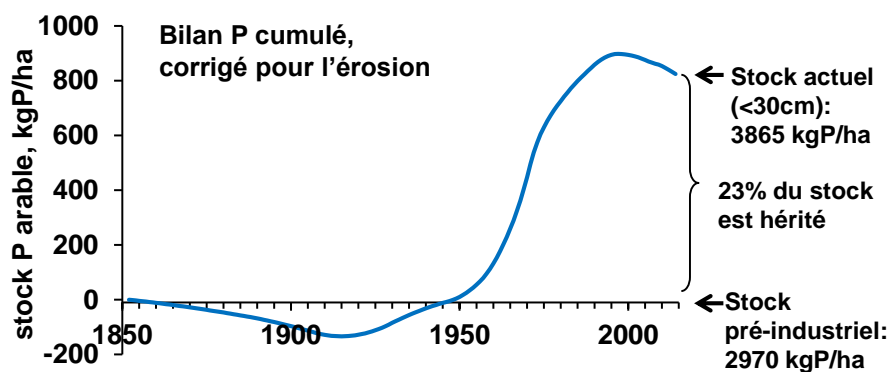


Figure 6. Bilan cumulé, corrigé de l'érosion nette, du phosphore ajouté au stock de P des sols arables pour le bassin de la Seine.

Au total, depuis 1850, ce sont des quantités importantes de phosphore apportées en surplus à l'exportation par la récolte et aux pertes érosives, qui se sont accumulées dans les sols arables. Traduits en concentration de P dans les 30 premiers cm de la colonne de sol, ces apports cumulés représentent 100-à 800 mgP/kgsol selon les régions françaises (Figure 7).

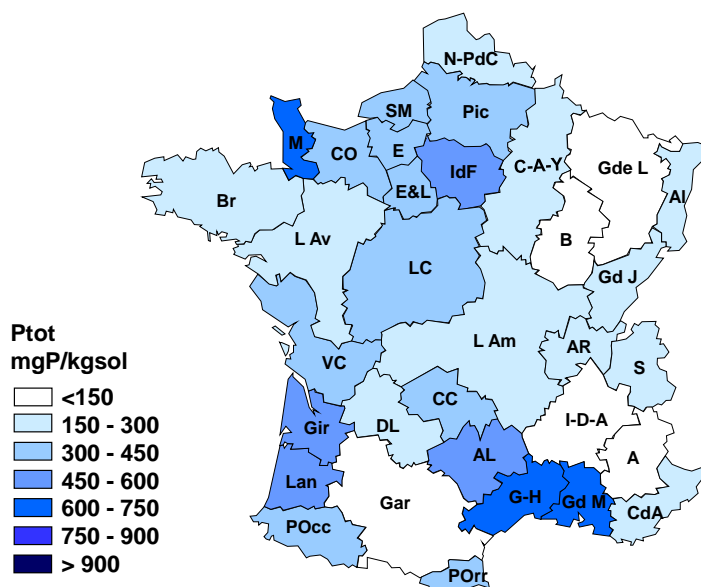


Figure 7. Cumul du phosphore apporté aux sols arables en surplus de l'exportation par la récolte et des pertes par érosion depuis 1850, exprimé en concentration dans les 30 premiers cm de sol.

### 2.3. Part héritée des stocks de phosphore des sols arables

Le contenu moyen en phosphore total actuellement observé dans les 30 premiers cm des sols arables des régions agricoles françaises a été calculé à partir des données spatialisées publiées par Delmas et al. (2015) (Figure 8). La comparaison avec les données de la figure 7 permet d'estimer la part héritée de ce stock actuel, et de déduire par différence du stock total et du stock hérité la concentration pré-industrielle en P (Figure 9). Ces données révèlent que les stocks de phosphore accumulés dans les terres arables sont constitués pour une part significative, variant selon les régions entre 7 et 80%, de l'héritage d'une fertilisation exogène excédentaire appliquée depuis la fin du XIXe siècle et plus particulièrement au cours des 30 années d'après-guerre.

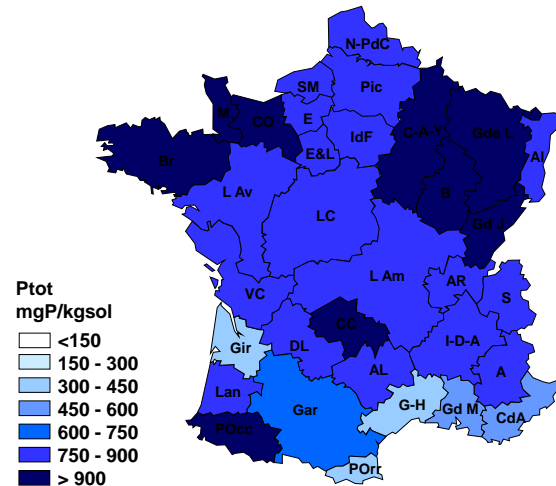
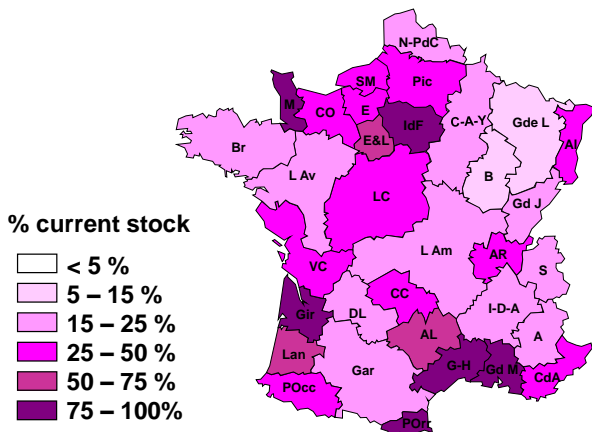


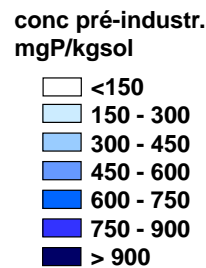
Figure 8. Teneur en phosphore dans les 30 premiers cm des sols arables, d'après les données du RMQS (Delmas et al., 2015).

### P hérité en % du stock actuel

### P tot pré-industriel (mgP/kgsoil) (= Ptot actuel – Surplus cumulé)



a.



b.

Figure 9. a. Part héritée en % du stock actuel de phosphore dans les sols agricoles.  
b. Estimation de la teneur pré-industrielle en P des sols arables.

## 3. Origine du phosphore dans les sols et dette écologique

L'importance de la partie héritée du contenu actuel des sols arables pose la question de l'origine géographique du phosphore accumulé. Une partie des apports aux terres arables provient du recyclage de la production végétale, via les déjections animales issues des fourrages cultivés localement ou des prairies permanentes, induisant un transfert de fertilité des prairies vers les terres arables d'une même région. Dans les régions où une part significative de l'alimentation du bétail est assurée par des aliments importés, la partie correspondante des déjections animales résulte d'un transfert de longue distance depuis les terres arables d'où proviennent ces aliments importés. Cependant, dans tous les cas, les apports de phosphore minéral constituent la partie dominante du cumul de la fertilisation. Il y a donc lieu de s'interroger sur l'origine de cette ressource.

### 3.1. La notion de dette écologique

La notion de dette écologique permet de passer des flux aux stocks accumulés et d'intégrer le passé jusqu'au présent pour penser de manière plus internationaliste les enjeux de durabilité future. Une définition concise de cette notion a été proposée par Martinez-Allier (2002) :

*« The first cause of ecological debt is ecologically unequal exchange, or the fact that exports of raw materials and other products from relatively poor countries are sold at prices that do not include compensation for local or global externalities. Ecologically unequal exchange is responsible for the following components of ecological debt: the (unpaid costs of reproduction or maintenance or sustainable management of the renewable resources that have been exported: for instance the nutrients incorporated in agricultural products ».*

Pour les transferts locaux de phosphore depuis les prairies permanentes vers les terres arables, il n'est pas pertinent de parler de dette écologique même si ces transferts peuvent soulever des questions concernant la durabilité de la gestion des prairies. En revanche, l'accumulation dans les sols français de phosphore provenant de ressources importées rentre parfaitement dans le cadre de la définition de la dette écologique, qu'il convient donc de caractériser et de quantifier.

### 3.2. L'approvisionnement Français en phosphore minéral

L'approvisionnement en phosphore minéral de la France a connu une histoire complexe, qu'il est nécessaire de retracer pour en appréhender l'origine (Figure 10). Les ressources primaires sont constituées par les gisements de roches phosphatées et par les scories de déphosphoration issues des aciéries. Au début du XXe siècle, ces ressources sont utilisées telles quelles en agriculture, et la France exploite essentiellement ses gisements locaux et ceux de ses colonies du Maghreb. Dès les années 30, cependant, le traitement des roches phosphatées et des scories par l'acide sulfurique devient la règle, et la France traite elle-même les minerais locaux ou importés, toujours essentiellement de ses colonies d'Afrique du Nord (Figure 11a). Cette industrie se développe considérablement dans les années 1960-1970, et l'on assiste à une certaine diversification des sources d'approvisionnement en minerais, même si le Maroc reste le principal fournisseur, avec les pays d'Afrique sub-saharienne. Les scories de déphosphoration issues de l'activité sidérurgique encore florissante jouent également un rôle significatif. Après le choc pétrolier, l'augmentation du prix de l'énergie conduit à un renchérissement considérable des engrais phosphorés, dont l'usage décroît considérablement. Parallèlement, les importations directes de super-phosphates ou d'acide phosphorique prennent progressivement le pas sur la production locale, au fur et à mesure que les pays disposant de ressources minières développent eux-mêmes leur industrie de transformation. Aujourd'hui, la France a cessé toute activité de traitement des roches phosphatées (Figure 10).



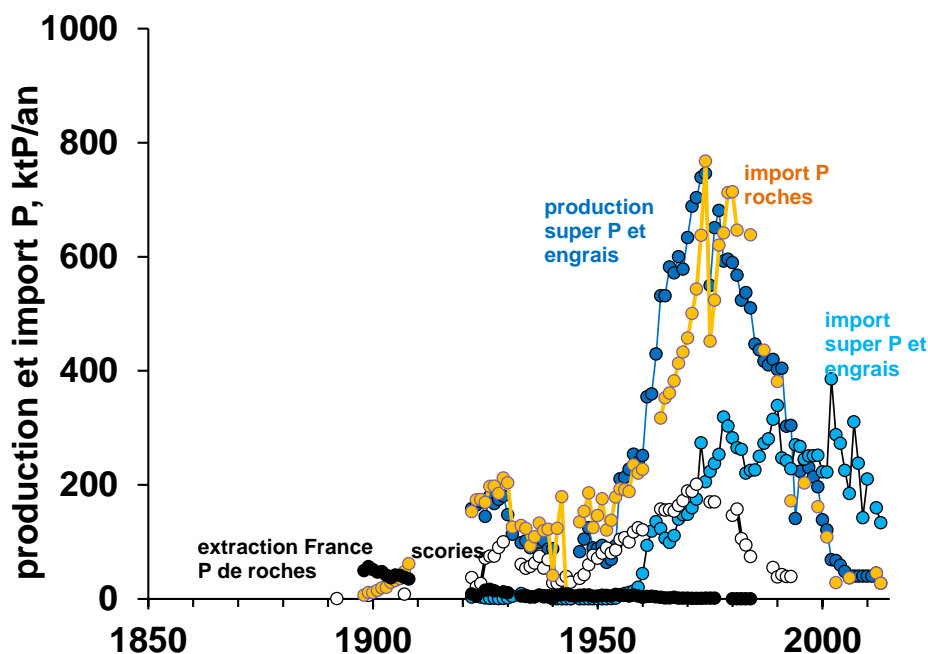


Figure 10. Production et importations françaises de minerais de phosphore et de super-phosphates depuis la fin du XIXe siècle.

Synthèse de nombreuses sources : Annuaire Statistique de l'ONU (1954),

FAOstat (<http://www.fao.org/faostat/>), Mineral Yearbook USGS

(<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/myb.html>), World mineral Statistics Archives (British geological survey) (<http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldArchive.html>), Pluvinage C (1912), Musset R (1939), Slansky M. (1975), Maïza S. (1984). BIPE (1998),

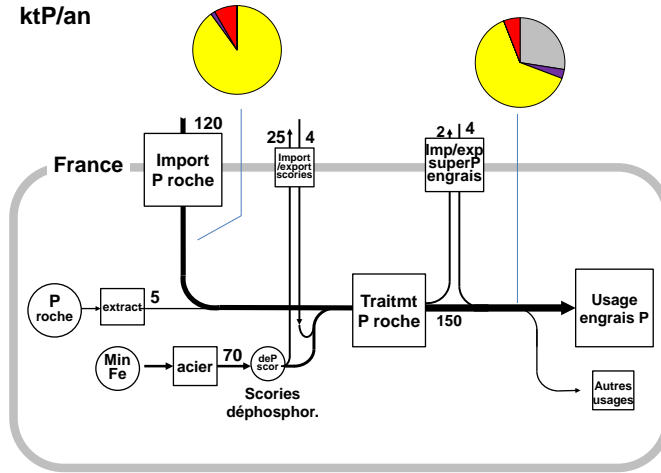
A partir de cette analyse, on peut retracer l'origine des phosphates utilisés en agriculture (Figure 11). Le phosphore étant une ressource non renouvelable, les stocks accumulés à une époque où la ressource était encore peu coûteuse représentent autant de phosphore qui ne sera plus disponible pour d'autres pays n'ayant pas eu les possibilités de fertiliser leurs sols par le passé. Dans un avenir plus ou moins proche où la raréfaction et le renchérissement des ressources minières risque de limiter la disponibilité du phosphore au niveau international, la gestion future de la fertilisation phosphorée des terres arables devrait donc tenir compte à la fois des besoins des plantes, des stocks hérités pouvant y subvenir, de la biodisponibilité du phosphore dans les sols et des besoins des plantes dans d'autres régions et pays n'ayant pas pu bénéficier des mêmes apports par le passé que les régions aujourd'hui les mieux dotées.

#### 4. Conclusion

L'analyse sur la longue durée des flux d'apport, de prélèvement et d'accumulation du phosphore dans les terres arables révèle quelques traits marquants de l'écologie territoriale du système agro-alimentaire français. Cette analyse confirme tout d'abord la périodisation de l'évolution de l'agriculture française établie essentiellement sur l'analyse des flux d'azote (Le Noë et al, 2018). Après une longue période de polyculture – élevage dominante, la fin du XIXe siècle marque un début timide de la fertilisation minérale, mais ce n'est que dans les années 1950 que s'accélère cette fertilisation minérale à un niveau d'excédent sans précédent par rapport aux besoins des cultures. Il en résulte l'établissement en quelques décennies de stocks hérités de phosphore dans les terres arables, qui suffisent aujourd'hui à assurer les besoins de la production agricole avec des apports fertilisants nettement plus faibles qu'auparavant. L'analyse des sources d'approvisionnement de l'industrie française des engrais permet de retracer l'origine de ces stocks de phosphore accumulé, qui constituent une forme de dette écologique que nous avons contractée. Les pays du Maghreb, du Moyen Orient et de l'Afrique sub-saharienne sont nos principaux créditeurs en cette matière.

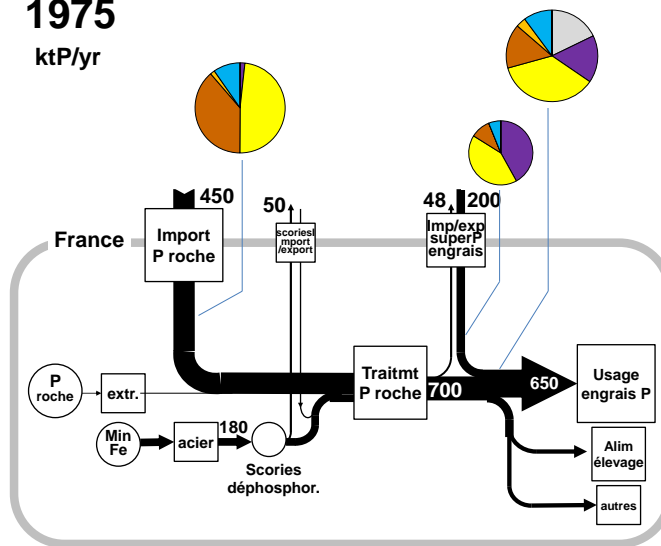
**1937**

ktP/an



**1975**

ktP/yr



**2012**

ktP/an

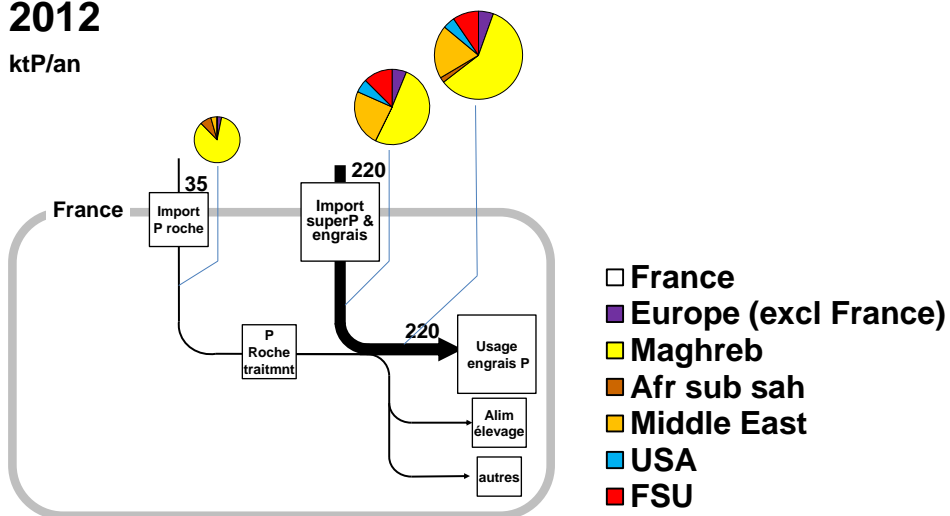


Figure 11. Structure et origine géographique de l’approvisionnement en phosphore de la France en 1937, 1975 et 2012.

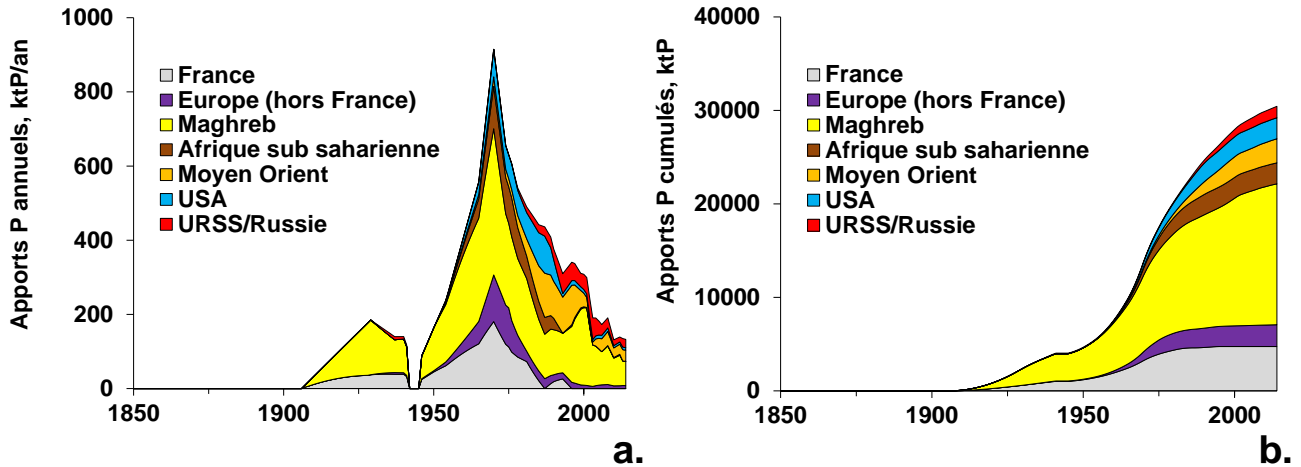


Figure 12. Importance et Origine géographique des fertilisants phosphorés utilisés en France depuis le début du XXe s. a. flux annuels, b. flux cumulés.

## Bibliographie

Annuaire Statistique de l'ONU, (1954).

BIPE, 1998. Evolution à long terme des structures de production et de consommation en France (1950-2010). Recherche effectuée pour le MATE. Rapport final 1998.

Borrelli, P., Van Oost, K., Meusburger, K., Alewell, B., Lugato, E., Panagos, P. (2018). A step towards a holistic assessment of soil degradation in Europe: Coupling on-site erosion with sediment transfer and carbon fluxes. *Environmental Research* 161:291-298.

Cerdan, O., Govers, G., Le Bissonnais, Y., Van Oost, K., Poesen, J., Saby, N., Gobin, A., Vacca, A., Quinton, J., Auerswald, K., Klik, A., Kwaad, F., Raclot, D., Ionita, I., Rejman, J., Rousseva, S., Muxart, T., Roxo, M.J., Dostal, J., Cerdan, E. (2010). Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. *Geomorphology* 122: 167-177.

Elser, J., Bennett, E., 2011. Phosphorus cycle: a broken biogeochemical cycle. *Nature* 478, 29–31. DOI: 10.1038/478029a.

Delmas, M., Cerdan, O., Mouchel, J.M., Garcin, M., 2009. A method for developing a large-scale sediment yield index for European river basins. *J. Soils Sediments* 9,613–626.

Delmas, M., Pak, L.T., Cerdan, O., Souchère, C., Le Bissonnais, Y., Couturier, A., Sorel, L. (2012). Erosion and sediment budget across scale: A case study in a catchment of the European loess belt. *Journal of Hydrology* 420-421: 255-263.

Delmas, M., Saby, N., Arrouays, D., Dupas, R., Lemerrier B, Pellerin S, Gascuel-Oudou C. (2015). Explaining and mapping total phosphorus content in French topsoils. *Soil Use and Management*. 31:259-269.

FAOstat (<http://www.fao.org/faostat/>).

Le Noë, J., Billen, G., Garnier, J. (2017). How the structure of agro-food systems shapes nitrogen, phosphorus, and carbon fluxes: the Generalized Representation of Agro-Food System applied at the regional

scale in France. *Science of the Total Environment* 586: 42–55.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.040>

Le Noë, J., Billen, G., Garnier, J. (2018). Phosphorus management in cropping systems of the Paris Basin : from farm to regional scale. *J. Environ. Management* 205: 18-28.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.039>

Le Noë, J., Billen, G., Esculier, F. & Garnier, J.. (2018). Long-term socioecological trajectories of agro-food systems revealed by N and P flows in French regions from 1852 to 2014. *Agr Ecosyst Env.* 265: 132-143.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.039>

Maïza, S.. (1984). Le commerce mondial des phosphates de 1973 à 1980. *Les Cahiers de l'Analyse des Données.* 9 : 7-32

Martinez-Allier, J. (2002). Marxism, social metabolism and ecologically unequal exchange. Document for World Systems Theory and the Environment, Lund University, 19-22 Sept. 2003. 21/2004 UHE/UAB-0303.2004. [https://ddd.uab.cat/pub/estudis/2004/hdl\\_2072\\_1194/UHE21-2004.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/estudis/2004/hdl_2072_1194/UHE21-2004.pdf)

Mineral Yearbook USGS (<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/myb.html>).

Musset, R. (1939). L'agriculture française et les engrais. *Annales de Géographie*, 48, 199-202. doi : <https://doi.org/10.3406/geo.1939.11552>

Pluvinage, C. (1912). *Industrie et commerce des engrais*. Baillière et fils, Paris

Slansky, M. (1975). Disponibilité et besoins futurs en minerais phosphatés compte tenu de la lutte anti-pollution et de nouvelles applications possibles. BRGM. Commission des Communautés Européennes. 75 SGN 219 GEO.

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., et al. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 6223, 1259855  
doi: 10.1126/science.1259855

World mineral Statistics Archives (British geological survey)  
<http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldArchive.html>