

Vers une gestion durable du phosphore, ressource critique pour l'agriculture

Le phosphore est un nutriment indispensable aux êtres vivants et à leurs systèmes alimentaires. Il est principalement apporté sous forme d'engrais de synthèse. Or, ces amendements reposent sur des réserves inégalement réparties dans le monde et non renouvelables à l'échelle du temps humain : les roches phosphatées. Ces caractéristiques questionnent notre utilisation de cette fertilisation minérale. Après un tour d'horizon des rôles du phosphore dans la croissance des plantes et des considérations géostratégiques sur la dépendance de nombreux pays vis-à-vis de cette ressource, cette note expose quelques pistes pour une gestion durable du phosphore.

Substance essentielle au métabolisme cellulaire des végétaux et des animaux, le phosphore (P) est un élément chimique indispensable à la vie, et à la croissance des plantes en particulier. Pour répondre aux besoins des cultures, le P est apporté aux champs sous forme d'engrais de synthèse ou d'amendements organiques. Si les seconds étaient historiquement majoritaires, un tournant se produit au milieu du XX^e siècle : les engrais minéraux, produits à partir de roches phosphatées, deviennent la principale source de P, devant le guano et les effluents¹. En 2014, l'*United States Geological Survey* (USGS) estime l'extraction mondiale de roches phosphatées à 218 millions de tonnes². Environ 90 % de la production sont utilisés à des fins de fertilisation agricole, les 10 % restants étant employés comme détergents et additifs alimentaires. Or, les roches phosphatées proviennent de gisements finis (formations géologiques d'origine sédimentaire et magmatique). Elles constituent donc une ressource limitée, que l'agriculture intensive, très dépendante au P d'origine fossile, contribue à épuiser. De plus, les réserves sont non-renouvelables

à l'échelle du temps humain, et très inégalement réparties dans le monde. Trois pays seulement assurent aujourd'hui plus de 70 % de la production mondiale : Chine, Maroc et États-Unis².

La demande en engrais phosphatés va vraisemblablement continuer à croître, en réponse à l'augmentation mondiale de la demande alimentaire. Cette pénurie de la ressource à moyen ou long terme est l'objet de débats. Faisant un parallèle avec le *Peak Oil*, Cordell *et al.*¹ estiment qu'il pourrait y avoir un *Peak Phosphorus*, c'est-à-dire que la production d'engrais à partir de roches phosphatées atteindra un maximum dans les prochaines décennies, avant de diminuer.

Cette note analyse les principaux enjeux liés au phosphore en agriculture. Elle présente d'abord les aspects agronomiques de la fertilisation phosphatée, avant d'examiner les risques associés à cette dépendance au P, depuis la répartition inégale de la ressource jusqu'à la consommation d'engrais phosphatés. Enfin, des pistes pour une gestion durable de la ressource, issues de différents travaux de recherche, seront exposées.

1 - Principaux enjeux liés à la fertilisation phosphatée

1.1 - Un facteur clé souvent limitant

Le phosphore est un élément chimique présent à la fois dans l'ADN³, l'ATP⁴ et les phospholipides membranaires. À ce titre, elle joue un rôle clé dans les mécanismes génétiques, le métabolisme énergétique et la structure des cellules des êtres vivants. Avec l'azote (N) et le potassium (K), cet élément minéral, non-substituable, est indispensable à la croissance des plantes. Il est présent dans le sol sous de nombreuses

1. Cordell D., Drangert J.O., White S., 2009, *The story of phosphorus: global food security and food for thought*, *Global Environmental Change* 19: 292-305.

2. U.S. Geological Survey, 2016, Mineral Commodity Summaries,

http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/

3. Acide désoxyribonucléique.

4. Adénosine triphosphate : molécule fournissant l'énergie nécessaire aux réactions chimiques.

formes, minérales ou organiques, en équilibre complexe les unes avec les autres. Seule une petite fraction de ce phosphore est disponible pour les plantes. Schématiquement, il pénètre dans les plantes à travers les transporteurs des cellules racinaires, sous forme d'ions phosphates HPO_4^{2-} ou H_2PO_4^- présents dans la solution du sol⁵. Ce transport est conditionné par le développement racinaire et l'exploration du sol, mais aussi par la présence de symbioses (mycorhizes). Or, la concentration du phosphore dans la solution du sol est faible par rapport aux besoins de la plante sur une année, et la fixation sur les particules du sol souvent importante (phase solide). La capacité du sol à réapprovisionner la solution est alors limitée, si bien que le P est le plus souvent peu disponible pour les plantes.

Le phosphore est donc un facteur limitant à la fois dans les écosystèmes naturels et dans les agroécosystèmes. Dans ces derniers, la fertilisation minérale ou organique (effluents d'élevage) peut compenser les exportations de P dues aux récoltes et combler les besoins en P des plantes. Dès lors, l'enjeu est double : avoir des apports suffisants pour ne pas pénaliser la production agricole (cf. encadré 1) ; ne pas avoir de bilans excédentaires pour limiter les risques environnementaux (cf. *infra*).

1.2 - Un phosphore qui peut aussi se retrouver en excès dans certaines régions

Les bilans en P dans le monde sont très contrastés et fréquemment problématiques, que ce soit par défaut ou par excès (cf. encadré 2 pour la situation française). En Afrique sub-saharienne, les apports en engrais minéraux sont très faibles et les sols acides, riches en oxydes de fer et d'aluminium, immobilisent le P, induisant de sévères carences pour les cultures⁶. Pour le maïs par exemple⁷, l'application de seulement 10 kg de P par hectare et par an pourrait accroître les rendements de 26 % en Afrique (et de 12 % en Amérique du Sud), contre seulement 8 % (et 4 %) pour la même dose d'azote. À l'inverse, en Asie et aux États-Unis, on assiste parfois à des situations d'excès marqués. On estime qu'en Chine, les pertes annuelles de phosphore dans l'environnement, dues aux productions animales et végétales, sont d'environ 20 kg de P par hectare dans les régions agricoles⁸. En Europe, les apports en engrais phosphatés sont conséquents, mais la concentration en P des sols cultivés est assez variable. Une récente étude⁹ a indiqué qu'un tiers des sols européens a une faible disponibilité en P, tandis que la moitié a une forte disponibilité en P (il

s'agit en général des zones où les rendements attendus sont les plus importants et où les apports d'effluents d'élevage ont été massifs). Les différences peuvent être marquées au sein d'un même pays : en France, la disponibilité en P des sols est plus importante dans la moitié Nord. Il est par ailleurs estimé que les besoins annuels européens en P s'élèvent à 3,85 Mt, alors que la consommation en fertilisants minéraux n'est « que » de 2,36 Mt. Mais comme environ la moitié du P épandu en Europe provient des effluents d'élevage, le bilan est en réalité largement positif, avec même des zones d'excédents importants⁹.

Dans le cas de l'agriculture biologique, la fertilisation minérale d'origine chimique est interdite. Les apports en P proviennent très largement des effluents d'élevage. Des chercheurs¹⁰ ont évalué que 72 % du P actuel du sol des exploitations biologiques proviennent des engrais de synthèse accumulés dans le sol lors de la période précédente « en conventionnel ». Ainsi, la durabilité de la fertilisation phosphatée en bio nécessite une complémentarité accrue entre productions végétales et animales.

Encadré 1 - Estimer les apports

Pour raisonner la fertilisation en P des plantes, le Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée (Comifer) propose une approche empirique reliant le rendement à un indicateur de biodisponibilité du P dans le sol (à partir d'analyses de terres), en fonction de l'exigence des cultures. Cette notion « d'exigence »¹¹ représente leur sensibilité à la carence en P, liée à la nature de leur système racinaire ou à leur métabolisme. Arvalis¹² a classé les cultures en trois groupes : celles très exigeantes en P (betterave, pomme de terre, luzerne, colza), celles moyennement exigeantes (blé dur, orge, maïs ensilage, sorgho, pois, ray-grass) et celles peu exigeantes (blé tendre, avoine, seigle, maïs grain, soja, tournesol).

Le Comifer a établi différentes valeurs seuils, au-dessus desquelles il est possible de réaliser une impasse de fumure ou au contraire en dessous desquelles une fumure renforcée est préconisée,

au-delà de la compensation des exportations en P par les cultures. Pour dépasser les difficultés à établir ces seuils, une approche par modélisation mécaniste du transfert sol-plante¹³ a été développée (ex : modèle Fussim-P-Maize), permettant de calculer des préconisations de fertilisation.

L'analyse de telles simulations et les observations expérimentales montrent que c'est la période précoce du cycle de la plante qui est critique pour son prélèvement de P. En effet, à ce stade, le système racinaire est encore peu développé et la demande en P par unité de longueur de racine est très élevée, si bien qu'une déficience en P en début de cycle limite fortement la croissance aérienne. La demande en P diminue ensuite à mesure que le système racinaire se développe. Pour ces raisons, les agriculteurs pratiquent souvent une fertilisation starter en P minéral en début de saison culturale.

5. La solution du sol est l'ensemble des éléments nutritifs dissous dans l'eau des sols. Elle est ré-alimentée en P par des mécanismes de désorption depuis la phase solide du sol, de dissolution des minéraux et minéralisation de la matière organique.

6. Nziguheba G., 2014, *Overcoming P deficiency in agricultural systems of sub-Saharan Africa: recent advances and limitation*, 5th International Symposium Phosphorus in Soils and Plants, Montpellier.

7. van der Velde M. *et al.*, 2013, *Affordable Nutrient Solutions for Improved Food Security as Evidenced by Crop Trials*, PLoS ONE 8(4): e60075.

8. Zhang F., 2014, *P in our world. Picture in agriculture of emerging countries in Asia*, 4th Sustainable Phosphorus summit, Montpellier.

9. Toth G., Guicharnaud R-A., Toth B., Hermann T., 2014, "Phosphorus levels in croplands of the European Union with implications for P fertilizer use", *European Journal of Agronomy*, (55) 42-52.

10. Nowak, B. 2013, *Diminuer la dépendance aux engrais de synthèse par le recyclage local des éléments minéraux : analyse des stratégies d'approvisionnement en éléments minéraux des exploitations agricoles biologiques*, thèse de doctorat, université de Bordeaux, 165 pages.

11. Ceci ne signifie pas que les plantes « très exigeantes » ont des besoins supérieurs en P, ou bien qu'elles ont des niveaux d'absorption ou d'exportation du P plus importants. Une carence en P limite en revanche davantage leur croissance aérienne, et donc le rendement.

12. Source : <http://www.arvalis-infos.fr/le-raisonnement-de-la-fertilisation-pk-repose-sur-quatre-criteres-@/240/view.jspx?obj=arvarticle&id=240&syndtype=nu11&hasRedirected=true>

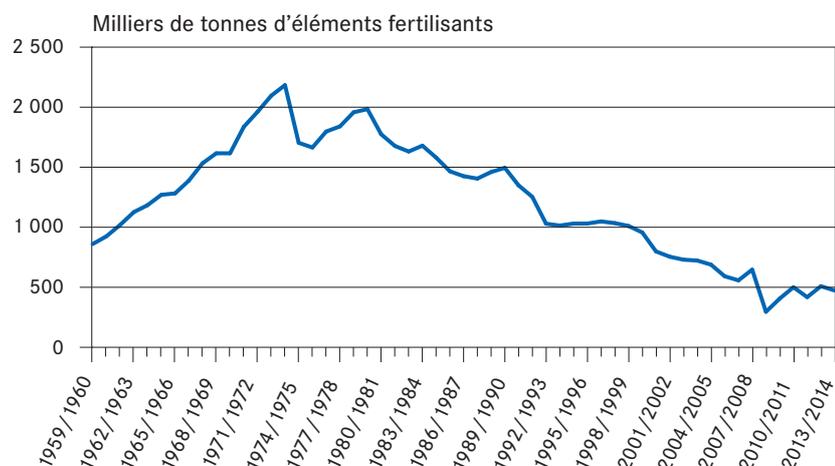
13. Mollier A., 2014, « La modélisation des relations sol-plante : l'exemple du phosphore », dans Pellerin S., Butler F., Guiard-Van Laethem C. (coord), *Fertilisation et environnement. Quelles pistes pour l'aide à la décision ?*, QUAE, pp. 202-216.

Encadré 2 - La situation en France

L'utilisation des engrais phosphatés, en particulier minéraux, s'est développée en France au cours de la seconde moitié du XX^e siècle. Cette hausse rapide liée à l'intensification agricole a été suivie d'un net recul des livraisons nationales depuis le début des années 1980, chutant d'environ 75 % (cf. figure 1). Les explications de cette baisse sont diverses : meilleur pilotage de la fertilisation (analyses de terres), réforme de la PAC (ex : mise en place des jachères au début des années 90), volatilité des prix des céréales ou encore hausse du prix des

engrais avec une sensibilité plus importante aux variations de prix pour le P (élément pouvant être apporté aux cultures de façon plus occasionnelle que l'azote)¹⁶. Si la France a mobilisé des ressources minérales nationales au milieu du XIX^e (mines de craie phosphatée du Nord pour ses « phosphates naturels », scories Thomas issues de la sidérurgie des minerais de fer en Lorraine)¹⁷, ses réserves en roches phosphatées sont peu importantes, créant une dépendance aux importations de P.

Figure 1 - Livraisons de phosphore à la culture



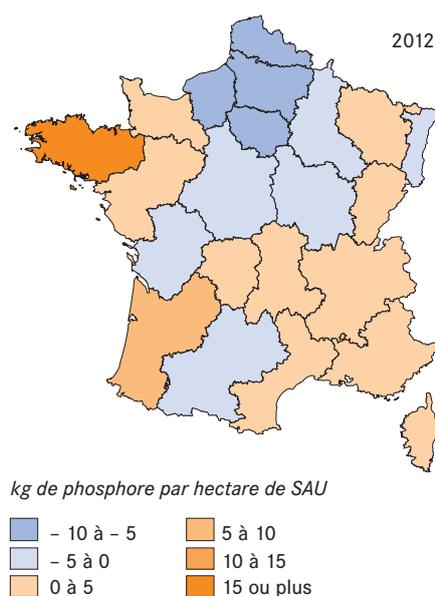
Source : auteures, à partir des données Unifa citées dans GraphAgri France 2015, p. 35 et Lebfèvre L., 2012, *op. cit.*

Le bilan national entre les apports et les exports est proche de l'équilibre depuis 2009, avec des disparités régionales : excédent de 16 kg de phosphore par ha de SAU en Bretagne, alors que 8 régions sont déficitaires (cf. figure 2).

Des chercheurs¹⁸ ont montré que le stock actuel en phosphore des sols agricoles français provenait à 82 % des roches phosphatées. Cette proportion a beaucoup augmenté entre 1948 et 1974 (+ 2,4 % par an), en lien direct avec la forte hausse de l'utilisation des engrais minéraux. Malgré la réduction de cette utilisation depuis la fin des années 1970, la part de P d'origine anthropique dans les sols a continué de croître. En effet, le P contenu dans les amendements organiques provient indirectement du P des roches phosphatées (par ex, appliqué sous la forme d'engrais de synthèse et qui se retrouve dans la nourriture des animaux d'élevage puis dans leurs déjections).

En revanche, le phosphore présent dans les cours d'eaux diminue, suite à la moindre utilisation agricole, à la limitation de cet élément dans les détergents et à la meilleure performance des stations d'épuration¹⁹.

Figure 2 - Bilan régional du phosphore



kg de phosphore par hectare de SAU



Source : auteures à partir des données Agreste, Citepa, Unifa, Comifer citées dans GraphAgri France 2015, p. 98

1.3 - Des enjeux environnementaux associés

La production d'engrais phosphatés, comme leur application, sont deux activités susceptibles d'avoir des impacts sur l'environnement. Au stade de l'extraction, l'enjeu se situe dans la présence de métaux lourds (ex : cadmium) ou d'éléments radioactifs (ex : uranium), dans les roches à partir desquelles est prélevé le P¹⁴. L'exposition à ces éléments se révèle toxique, tant pour l'Homme que pour les plantes, même à l'état de traces. Ces contaminants peuvent se retrouver au stade de l'application d'engrais, s'accumulant ainsi dans les sols.

Un autre problème est lié à l'augmentation de la concentration de phosphore dans l'environnement¹⁴. Élément habituellement limitant des organismes aquatiques, le transfert du P excédentaire, par érosion ou ruissellement, dans les eaux de surface ou du littoral, peut favoriser le développement de la végétation aquatique, causer des phénomènes d'eutrophisation et porter atteinte aux écosystèmes associés.

Malgré l'absence de réglementation européenne, des initiatives régionales ou nationales, répertoriées par Amery *et al.*¹⁵, encadrent l'application des engrais phosphatés afin de limiter les impacts des pertes de phosphore sur l'environnement. Les critères sont variables selon les régions, et plus ou moins détaillés : maximum d'application, prise en compte des types de fertilisants phosphatés, des cultures concernées ou encore de l'état des sols, etc.

14. Reijnders L., 2014, "Phosphorus resources, their depletion and conservation, a review", *Resources, Conservation and Recycling*, 93, pp 32-49.

15. Amery F., Schoumans O. F., 2014, *Agricultural phosphorus legislation in Europe*, ILVO, 45 pages.

16. Lebfèvre L., 2012, *Campagne culturale 2011/2012 : recul des livraisons d'engrais malgré des prix agricoles favorables*, Agreste Synthèses - Moyens de production - n° 80.

17. Bornuat M., 2009, « Agriculture et engrais en France : un aperçu historique », *Géologues*, n° 162, pp. 26-30.

18. Ringeval B., Nowak B., Nesme T., Delmas M., Pellerin S., 2014, "Contribution of anthropogenic phosphorus to agricultural soil fertility and food production", *Global Biogeochemical Cycles*, (28), 12 p.

19. Site SoeS, 2015, Évolution de la contamination des cours d'eau par les macropolluants : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/2000/0/evolution-contamination-cours-deau-macropolluants.html>

2 - Le phosphore, une ressource géostratégique

2.1 - Une dépendance mondiale aux roches phosphatées

Pour répondre aux besoins des plantes, différentes sources de P sont envisageables : effluents d'élevage, excréments humains ou d'animaux, os (broyés ou cendres), résidus de cultures, déchets organiques, guano, scories Thomas¹⁴. Actuellement, ces apports reposent en majorité sur les engrais minéraux, dont le P est issu de roches phosphatées.

Outre une application directe de ces roches sur les sols acides, une grande diversité de produits contenant du P existe. Leur fabrication repose sur la synthèse d'acide phosphorique, produit intermédiaire issu du traitement des roches phosphatées par l'acide sulfurique. Ce procédé découvert en 1842 par John Lawes marque le début de l'industrie des engrais minéraux²⁰. Aujourd'hui, ces fertilisants représentent environ 90 % de l'utilisation de l'acide phosphorique, les formes les plus employées par les agriculteurs étant le phosphate de diammonium (DAP) et de monoammonium (MAP)²¹.

L'intensification agricole dans les pays développés, à partir des années 1960, s'est appuyée sur ces amendements minéraux, tirant la demande mondiale en engrais phosphatés. Depuis les années 1990, les sols de ces pays ont déjà une forte disponibilité en P, et la consommation de P diminue en conséquence. Les pays émergents et en développement sont désormais les

principaux contributeurs à la demande mondiale, avec de fortes différences. Alors que la Chine est le premier pays consommateur d'engrais phosphatés (à hauteur de 28 % en 2013), le continent africain ne représente que 3,3 % de la demande mondiale²².

À la différence des engrais azotés de synthèse, dont la matière première est abondante partout dans le monde, les réserves de roches phosphatées sont concentrées en un nombre réduit de pays, source de vulnérabilité pour les pays avec peu ou pas de ressources. De plus, cette dépendance structurelle à une unique ressource non-renouvelable questionne le devenir de son utilisation dans le temps long (cf. encadré 3).

2.2 - Des réserves inégalement réparties

Le caractère fini de la ressource en roches phosphatées explique l'attention portée à l'estimation des réserves disponibles. Ainsi, à l'échelle mondiale, les réserves décou-

tes, économiquement et techniquement exploitables au moment de l'estimation, seraient de l'ordre de 69 Gt². La répartition de ces réserves est très disparate et concentrée, le Maroc représentant à lui seul 73 % des gisements actuellement mobilisables, suivi de la Chine (plus de 5 %) et de l'Algérie (plus de 3 %)².

Cependant, ces estimations recouvrent de grandes incertitudes et sont sujettes à caution²⁰. Le caractère déclaratif des données transmises par les industries privées et les agences gouvernementales est ainsi questionné, la valeur annoncée ayant une dimension stratégique importante²³. Ainsi, les réserves estimées par l'USGS sont passées de 16 à 65 milliards de tonnes entre 2010 et 2011, suite à la révision des réserves commercialement exploitables au Maroc et dans le Sahara occidental.

La production mondiale de roches phosphatées est de l'ordre 218 Mt en 2014, et trois pays seulement ont extrait plus de 70 % de ce total, à savoir la Chine (46 %), les États-Unis (14 %) et le Maroc (12 %)².

20. Ulrich A. E., Frossard E., 2014, "On the history of a reoccurring concept: Phosphorus scarcity", *Science of the Total Environment*, 490, pp. 694-707.

21. Voir : PotashCorp, <http://www.potashcorp.com/overview/nutrients>

22. Calcul auteures à partir des données IFADATA, <http://ifadata.fertilizer.org/ucSearch.aspx>

23. Elser J., Bennett E., 2011, "Phosphorus cycle: A broken biogeochemical cycle", *Nature*, 478, pp. 29-31.

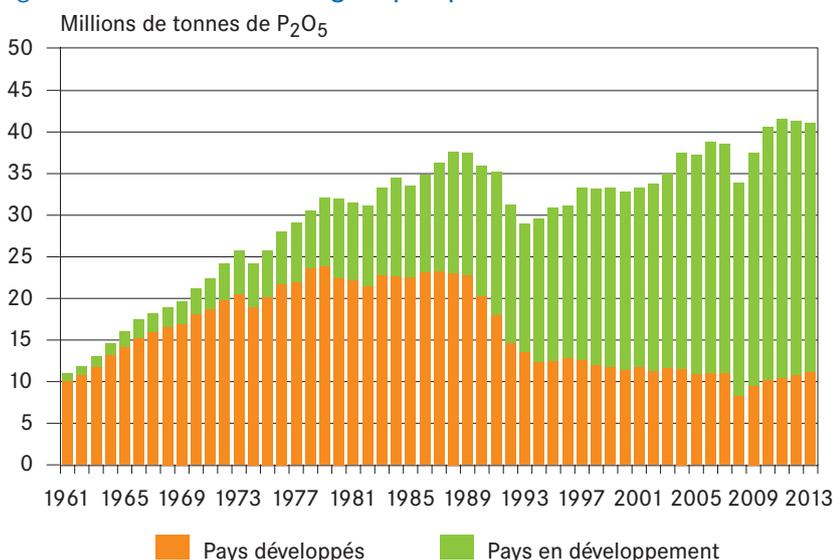
24. Koppelaar R.H.E.M., Weikard H.P., 2013, "Assessing phosphate rock depletion and phosphorus recycling options", *Global Environmental Change*, 23, pp. 1454-1466.

Encadré 3 - Du phosphore jusqu'à quand ? Le débat sur le *peak phosphorus*

Dès le XIX^e siècle, la reconnaissance du P comme élément limitant pour l'agriculture européenne s'est accompagnée de discours sur l'épuisement de cette ressource. Ainsi von Liebig, fervent défenseur des engrais phosphatés, discutait de la possible pénurie du guano. Le débat, et en particulier le concept de *peak phosphorus*, s'est popularisé suite à la publication de Cordell *et al.* en 2009. De nombreux travaux, qu'ils recourent à la modélisation ou au prolongement des tendances, offrent des résultats contrastés, allant d'une apparition du pic vers la moitié du XXI^e siècle à une augmentation continue de la production jusqu'en 2100²⁴.

Des incertitudes rendent délicat le calcul du nombre d'années avant épuisement de la ressource en P. Tout dépend de l'estimation des réserves (cf. *infra*) et de l'estimation des besoins à horizon lointain, même si une hausse de la demande est attendue ces prochaines décennies. De plus, les questions environnementales (ex : besoins en eau des industries minières, impacts écologiques), la qualité des roches phosphatées (concentration en P et en éléments contaminants) et des variables géopolitiques peuvent également remettre en question l'anticipation de ce pic²⁸.

Figure 3 - Consommation d'engrais phosphatés



Source : auteures à partir des données IFADATA, <http://ifadata.fertilizer.org/ucSearch.aspx>

Cette production connaît une tendance haussière à partir du XIX^e siècle, avec une accélération notable depuis la fin de la seconde guerre mondiale (hors période 1989-1994²⁵). Le prix de ces roches, a quant à lui, connu deux pics ces cinq dernières décennies (cf. encadré 4).

En comparant les réserves de roches phosphatées, la production (roches, acide phosphorique et engrais) et la consommation, il est possible de distinguer trois types de pays ou de régions :

- les **pays producteurs avec une faible demande interne** comme le Maroc, qui est le premier exportateur de roches phosphatées en 2013 (environ 30 % des exportations mondiales), ainsi que d'acide phosphorique (49 %), et dans les quatre premiers s'agissant des DAP-MAP²¹ ;
- les **pays producteurs et consommateurs** comme la Chine, qui est le premier producteur d'acide phosphorique, principalement à partir de roches extraites localement, et qui représente également 40 %

de la demande mondiale en DAP et MAP, tout en étant également le premier producteur²¹ ;

- les **pays consommateurs, avec peu ou pas de réserves**, comme ceux d'Europe, qui importent plus qu'ils n'exportent, pour une autosuffisance en roches phosphatées de 10 %²⁶, et qui constituent la seconde région importatrice au niveau mondial pour tous les produits²¹.

Obsteiner *et al.*²⁷, quant à eux, distinguent les nations productrices de P des pays consommateurs, riches ou bien avec de faibles revenus et touchés par l'insécurité alimentaire. Les intérêts divergents de ces pays, liés à leurs inégalités structurelles de production comme d'usage, pourraient rendre impossible une gestion durable de la ressource. Ces différences questionnent également l'accessibilité pour les paysans les plus pauvres.

Figure 4 - Répartition de la production et de la consommation de roches phosphatées

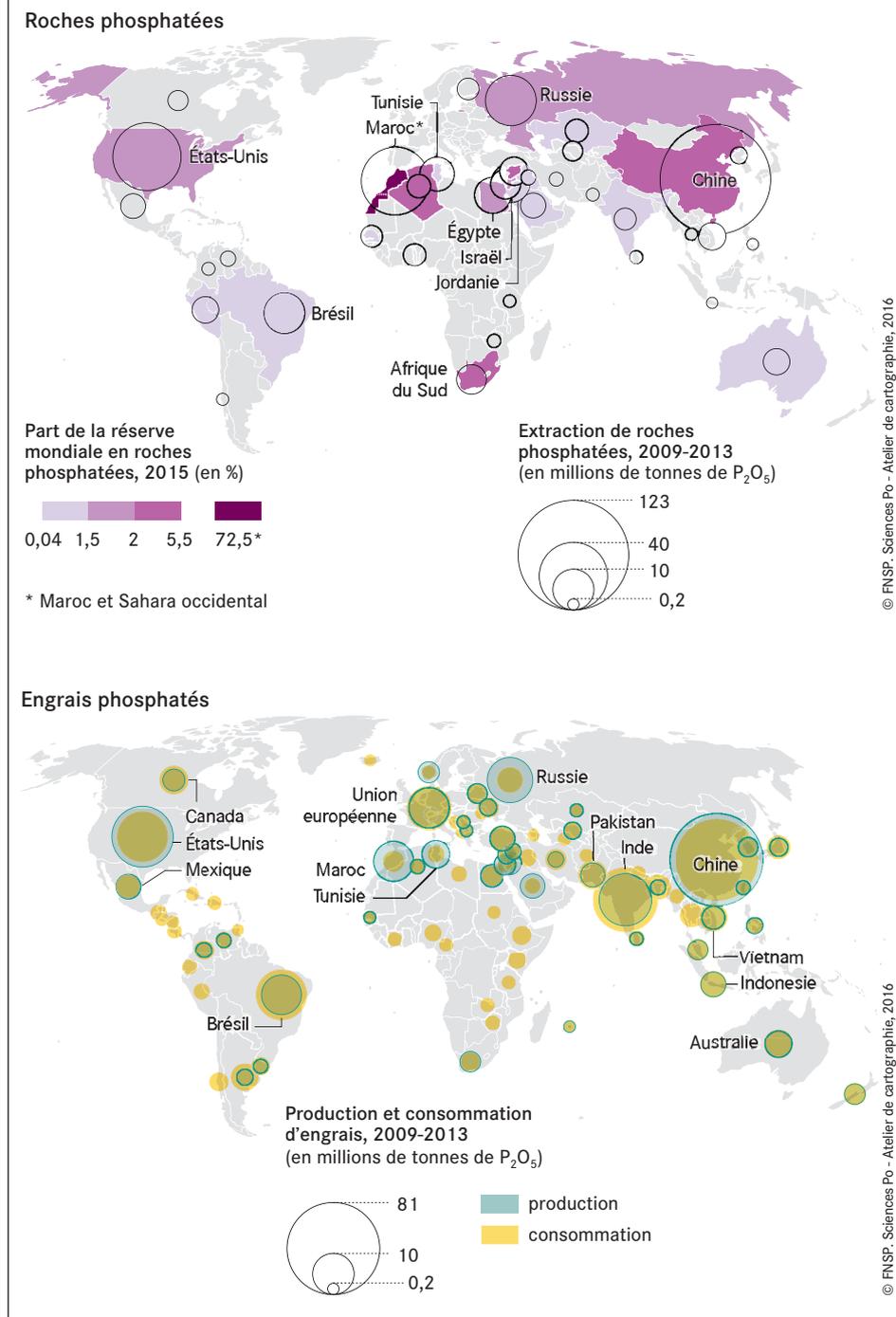
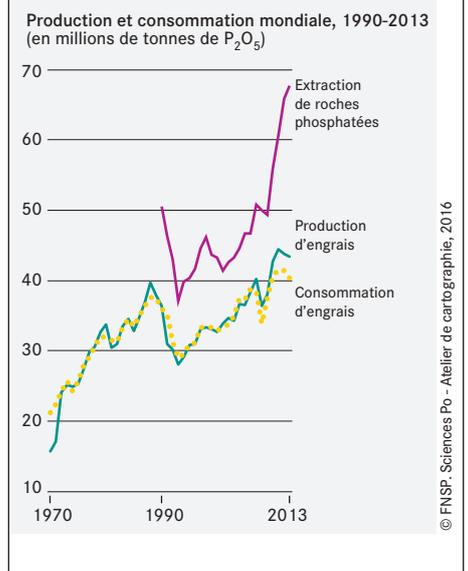


Figure 5 - Production et consommation de roches phosphatées



Sources : United States Geological Survey (USGS), 2016, <http://minerals.usgs.gov> ; International Fertilizer Industry Association (IFA), 2015, <http://ifadata.fertilizer.org>

25. Ces années connaissent un déclin de l'extraction de roches phosphatées suite à l'effondrement de l'URSS et à la baisse de la demande en Amérique du Nord et en Europe de l'Ouest. Voir : Heckenmüller M., Narita D., Klepper G., 2014, "Global availability of phosphorus and its implication for global food supply: an economic review", Kiel Working Papers, n° 1897.

26. Ecorys, DG Environnement, 2012, *Mapping resource prices: the past and the future*.

27. Obsteiner M. *et al.*, 2013, "The phosphorus trilemma", *Nature Geoscience*, 6, pp. 897-898.

Sources : United States Geological Survey (USGS), 2016, <http://minerals.usgs.gov> ; International Fertilizer Industry Association (IFA), 2015, <http://ifadata.fertilizer.org>

2.3 - Les risques associés à cette dépendance

Plusieurs risques sont régulièrement cités, dans la littérature, à propos de cette dépendance de nombreux pays aux roches phosphatées²⁸ :

- le premier est lié à l'intégration verticale, soit le contrôle par un même opérateur de l'ensemble de la chaîne de production. 70 % des entreprises productrices de roches phosphatées, dans le monde, contrôleraient l'étape d'extraction jusqu'à celle de la production d'engrais ou d'autres produits phosphatés. Un autre enjeu est la concentration des acteurs, certains auteurs²³ n'excluant pas que le Maroc soit en situation de monopole à l'avenir ;

- les décisions commerciales des États sont attentivement suivies, pour les tensions qu'elles peuvent générer sur le marché des roches phosphatées. Par exemple, la Chine a mis en place des mesures de restriction à l'exportation sur le P en 2008. Elles ont fait l'objet en 2009 d'un règlement des différends élargi à d'autres matières premières, porté par les États-Unis, l'Union européenne et le Mexique. Ces mesures ont été reconnues incompatibles avec les règles de l'OMC²⁹ ;

- les instabilités politiques en Afrique du Nord et au Moyen-Orient, comme les tensions à propos du Sahara occidental ou le conflit syrien, sont sources d'incertitudes pour la production future de P. Le Printemps arabe a par exemple causé des interruptions d'exportations vers l'Europe, suite à une importante chute de l'extraction.

3 - Quelques pistes pour une gestion durable de la ressource

Le caractère épuisable des réserves en phosphore, ainsi que les risques associés à leur concentration géographique, posent la question de la gestion durable du P et rendent nécessaire la recherche d'une moindre dépendance à cette ressource. En plus d'améliorer l'efficacité de la mobilisation de la ressource par l'agriculture, la recherche agronomique formule des pistes qui combinent des actions au niveau de l'offre (nouvelles sources de P et recyclage) et de la demande (meilleure efficacité d'utilisation et moindre demande), et ce de l'échelle de la plante à celle des systèmes agroalimentaires mondiaux.

Au niveau de la plante, une option consiste à sélectionner les variétés qui ont les meilleures performances d'acquisition

et/ou d'utilisation du phosphore du sol. Les recherches en génétique sur le riz³⁰ ont par exemple permis d'identifier des gènes (ex : PSTOL1) jouant un rôle dans l'amélioration du développement racinaire et du prélèvement de P dans les sols pauvres. D'autres recherches portent sur la *P use efficiency* (amélioration de la quantité de biomasse produite pour une quantité de P prélevée). Pour cela, les mécanismes de redistribution du P au sein de la plante, en période de carence phosphatée, sont étudiés (e.g. réduction de la teneur en P des grains, de façon à avoir de moindres exportations de P pour un même niveau de rendement³¹).

Au niveau de la parcelle, l'amélioration de l'efficacité d'utilisation du P du sol est également explorée. Un essai de cultures associées céréales/légumineuses a montré que les interactions entre plantes pouvaient faciliter le prélèvement du P en début de cycle³². L'utilisation de variétés prélevant efficacement le P dans des bandes enherbées, autour des parcelles, limite les flux de P vers les cours d'eaux, et cette production pourrait être valorisée comme engrais vert sur les parcelles cultivées³³. Les pratiques de fertilisation peuvent d'ailleurs être sources d'économies de P, selon le

Encadré 4 - La volatilité des prix comme signal de rareté ?

Le prix de la roche phosphatée a connu plusieurs hausses significatives, notamment en 2007-2008. La littérature cite divers facteurs explicatifs, dont il est difficile de déterminer la part respective : augmentation de la demande en engrais tirée par les prix hauts des matières premières agricoles (demande alimentaire), production d'engrais insuffisante pour répondre à cette hausse de la

demande et des ajustements décalés dans le temps, prix élevé du baril de pétrole impactant les coûts d'extraction et de transport, activité de cartel entre producteurs, accords bilatéraux entre le Maroc et des pays consommateurs (ex : Union européenne, États-Unis, Inde)³⁴, etc. La hausse des prix n'est en revanche pas présentée par tous les auteurs comme un reflet de la rareté.

28. de Ridder M., de Jong S., Polchar J., Lingemann S., 2012, *Risks and opportunities in the global phosphate rock market - Robust strategies in times of uncertainty*, The Hague Center for Strategic Studies, n° 7/12/12 29. Voir : https://www.wto.org/french/tratop_f/dispu_f/cases_f/ds394_f.htm

30. Wissuwa M., Rose T., 2014, *Breeding for enhanced phosphorus efficiency in rice*, 4th Sustainable Phosphorus summit, Montpellier. Wissuwa et al., 2014, *Assessment of root trait variation under phosphorus deficiency through Genome-Wide Association Analysis*, Phosphorus in Soils and Plants 5, Montpellier.

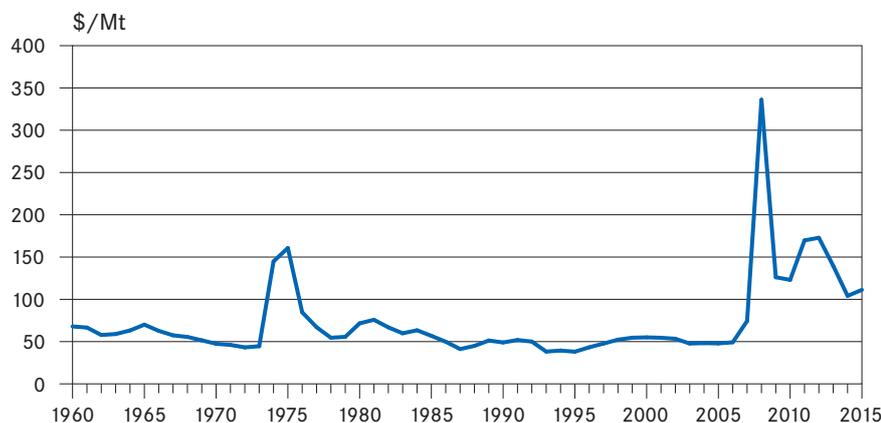
31. Vandamme et al., 2014, *Reducing grain P concentration in rice through genetic improvement - an option for sustainable P management?*, Phosphorus in Soils and Plants 5, Montpellier.

32. Journet E.P. et al., 2014, *Is P acquisition facilitated by intercropping of durum wheat and grain legumes in field conditions?*, Phosphorus in Soils and Plants 5, Montpellier.

33. George T.S. et al., 2014, *Designer riparian buffers - using plant phylogeny to close the arable agricultural phosphorus (P) cycle*, Phosphorus in Soils and Plants 5, Montpellier.

34. De Ridder M. et al., 2012. *op cit.* ; Heckenmüller et al., 2014. *op cit.* ; Ecorys, DG Environnement, 2012. *op cit.* ; Rosemarin A., Ekane N., 2016, "The governance gap surrounding phosphorus", *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 104, pp. 265-279.

Figure 6 - Prix réel des roches phosphatées en 2010



Source : Banque mondiale, Global Economic Monitor (GEM) Commodities

principe de « mieux nourrir la plante et moins le sol »³⁵. Ainsi, à la fois la formulation des engrais minéraux (libération prolongée, inhibition de la complexation du P dans le sol, solubilité) et les modalités d'application (doses, localisation, gestion temporelle) pourraient être améliorées. Il conviendrait également de mieux prédire la fraction de P du sol réellement disponible pour la plante aux stades critiques de son développement. Inversement, dans les régions très déficitaires en P (ex : Afrique), favoriser l'accès des agriculteurs aux engrais minéraux permettrait d'améliorer les rendements.

Certaines pratiques agricoles permettent de réduire les pertes de P du sol dues à l'érosion et au ruissellement : incorporation des résidus agricoles dans les sols, couverts végétaux, aménagements comme les cultures en terrasses, etc. Pour certaines pratiques, à l'instar du non-labour, le résultat est plus mitigé, nécessitant un bilan préalable à son application pour estimer les impacts sur le phosphore¹⁴. Une autre piste serait la remobilisation du phosphore présent dans le sol, consistant à rendre à nouveau disponible pour la plante le phosphore qui lui est actuellement inaccessible. L'inoculation des graines ou des jeunes plantes avec des micro-organismes, qui solubilisent le phosphore inorganique, est un exemple d'application. Les résultats

des expérimentations sur le terrain sont contrastés, mais cette piste n'a été qu'en partie explorée¹⁴.

Plus largement, au niveau des systèmes agroalimentaires, une piste majeure est le recyclage des résidus organiques, principalement les effluents d'élevage, mais aussi les boues de stations d'épuration, déchets agro-industriels, déchets verts, etc. Une expertise scientifique collective³⁶ sur ces matières fertilisantes d'origine résiduaire (Mafor) a conclu, pour la France, que « les quantités de phosphore présentes dans les Mafor pourraient couvrir l'ensemble des prélèvements annuels de phosphore par la production agricole ».

Ainsi, le P contenu dans les effluents d'élevage pourrait être recyclé plus efficacement sur les terres cultivées. Toutefois, lorsque les activités de culture et d'élevage sont ségréguées spatialement, les effluents s'accumulent dans les régions d'élevage, produisant des excès de P dans le sol, tandis que les régions de grandes cultures doivent recourir aux engrais minéraux³⁷. Pour favoriser le recyclage du P, la polyculture-élevage devrait être promue, soit au niveau des exploitations agricoles, soit au niveau des territoires. En plus de la spécialisation, d'autres freins existent au recyclage du P d'origine organique³⁸ : le ratio N/P des effluents d'élevage est faible, si bien que l'utilisation de ces derniers, en vue d'une fertilisation azotée, conduit à des excès de P dans le sol. Il demeure des incertitudes quant à la capacité du P organique à répondre aux besoins des plantes en début de cycle (période critique), et la teneur exacte des effluents en P doit être mieux connue, teneur qui pourrait d'ailleurs être réduite à travers une meilleure efficacité d'utilisation du P par les animaux. Des chercheurs³⁹ mettent au point un procédé séparant le P de la matière organique et permettant de l'épandre comme un fertilisant minéral. D'autres pistes existent en dehors des systèmes agricoles, comme l'extraction de phosphore de l'urine ou des eaux usées urbaines sous forme de struvite.

À l'autre extrémité du système agroalimentaire, une autre piste consiste à favoriser les régimes alimentaires diminuant les exportations de P vers l'alimentation humaine. Par exemple, la consommation de protéines animales est plus consommatrice en P que celle de protéines végétales, du fait d'une faible efficacité de la digestion du

phosphore, en particulier des monogastriques. En réduisant les pertes post-récoltes et les gaspillages alimentaires, on pourrait enfin limiter les pertes de P associées.

**
*

Le phosphore est un nutriment clé pour les êtres vivants, et de ce fait également pour les systèmes agricoles et alimentaires. Parmi les amendements utilisés pour lever les contraintes de disponibilité de P dans les sols, les engrais phosphatés de synthèse sont la principale source d'apport au niveau mondial – en comparaison avec les effluents organiques. Or ces engrais minéraux sont fabriqués à partir d'une unique ressource, les roches phosphatées. Leurs gisements sont finis et non-renouvelables, avec des incertitudes sur la taille de la ressource globale. De plus, les réserves inégalement réparties constituent un risque d'accessibilité pour les paysans les plus pauvres et de vulnérabilité pour les régions sans ressource physique. Les roches phosphatées sont d'ailleurs classées par l'Union européenne comme matière première minérale critique depuis 2014⁴⁰. De même, les États-Unis et la Chine les ont désignées comme un élément crucial pour la sécurité nationale^{14,28}.

Face aux changements globaux en cours et à venir, en particulier la hausse de la demande alimentaire, la dépendance de l'agriculture aux engrais de synthèse en P et le caractère non-substituable de ce nutriment appellent à une gestion durable. De nombreuses pistes d'actions, de la « mine à la fourchette », sont identifiées dans la littérature, mais restent peu mobilisées jusqu'à présent. La création de l'*European Sustainable Phosphorus Platform*⁴¹ en 2013 rassemble divers acteurs, entre autres pour améliorer l'utilisation du P et les pistes de recyclage. Les experts appellent à une gouvernance mondiale, indispensable pour assurer la disponibilité et l'accès à long terme à cet élément⁴². Elle viserait à informer et sensibiliser l'ensemble des acteurs, dont les citoyens, mais aussi à établir des normes et lignes directrices partagées pour assurer une gestion durable du P.

Élise Delgoulet, Noémie Schaller⁴³
Centre d'études et de prospective

35. Withers P.J.A. *et al.*, 2014, "Feed the crop not the soil: rethinking phosphorus management in the food chain", *Environmental science and technology*, 48, pp. 6523-6530.

36. Voir : <http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Expertises/Toutes-les-actualites/Expertise-Mafor-effluents-boues-et-dechets-organiques>

37. Senthilkumar K. *et al.*, 2012, "Regional-scale phosphorus flows and budgets within France: The importance of agricultural production systems", *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 92, 2, pp. 145-159.

38. Pellerin S. *et al.*, 2014, *Phosphorus in manures and other organic products: what limits proper recycling of this resource in agriculture?*, 4th Sustainable Phosphorus summit, Montpellier.

39. Voir : <http://www.irstea.fr/nos-editions/info-media/le-phosphore-des-dechets-delevage-recycler-et-depolluer>

40. Voir : http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-599_fr.htm

41. Voir : <http://www.phosphorusplatform.eu/>

42. Rosemarin A., Ekane N., 2016, *op. cit.*

43. Travaillait au CEP au moment de la rédaction de cette note.

Dernières analyses publiées par le Centre d'études et de prospective du ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

Analyse n° 58, juillet 2013, Statut et droits de l'animal d'élevage en France : évolution, enjeux et perspectives
Analyse n° 59, juillet 2013, L'agroécologie : des définitions variées, des principes communs
Analyse n° 60, juillet 2013, Des systèmes de production visant la double performance économique et environnementale
Analyse n° 61, septembre 2013, L'agriculture de conservation
Analyse n° 62, septembre 2013, Agriculture, forêt, climat : vers des stratégies d'adaptation - Résultats clés de la prospective AFClim
Analyse n° 63, septembre 2013, Transitions vers la double performance : quelques approches sociologiques de la diffusion des pratiques agroécologiques
Analyse n° 64, octobre 2013, Les différences sociales en matière d'alimentation
Analyse n° 65, novembre 2013, Le Partenariat Européen pour l'Innovation (PEI) : la mise en réseaux comme levier de l'innovation en agriculture
Analyse n° 66, janvier 2014, Zoonoses émergentes et réémergentes : enjeux et perspectives
Analyse n° 67, février 2014, Le recours aux satellites en agriculture : évolutions récentes et perspectives
Analyse n° 68, avril 2014, La disponibilité future de la ressource en eau en France : quelle place pour le secteur agricole ?
Analyse n° 69, mai 2014, Consommations et pratiques alimentaires durables : analyse de données nationales issues d'enquêtes d'opinion
Analyse n° 70, mai 2014, Évaluation du volet « mobilisation des bois chablis » du plan de solidarité nationale consécutif à la tempête Klaus
Analyse n° 71, juin 2014, Défis sociaux et environnementaux du capitalisme agraire. Le cas des plantations de palmier en huile en Asie du Sud-Est
Analyse n° 72, juillet 2014, Des « biens publics » au « verdissement » : l'influence des nouveaux acteurs de la réforme de la PAC
Analyse n° 73, octobre 2014, L'agriculture française face au défi climatique : quelles perspectives d'atténuation de ses émissions de gaz à effet de serre ?
Analyse n° 74, octobre 2014, Le nouveau *Farm Bill* américain : un renforcement des assurances agricoles subventionnées et des filets de sécurité anticycliques
Analyse n° 75, novembre 2014, L'agriculture à « Haute Valeur Naturelle » en France métropolitaine - Un indicateur pour le suivi de la biodiversité et l'évaluation de la politique de développement rural
Analyse n° 76, janvier 2015, Des projets agro-environnementaux innovants, intégrés et collectifs : quelques enseignements tirés de l'analyse d'expériences de terrain
Analyse n° 77, mars 2015, Quelle adaptation de l'agriculture à la disponibilité en eau dans la Drôme des collines ?
Analyse n° 78, avril 2015, Inégalités sociales et alimentation. Besoins et attentes des personnes en situation d'insécurité alimentaire
Analyse n° 79, avril 2015, Produits de stimulation en agriculture visant à améliorer les fonctionnalités biologiques des sols et des plantes : état des lieux et perspectives
Analyse n° 80, juin 2015, Les innovations technologiques, leviers de réduction du gaspillage dans le secteur agro-alimentaire
Analyse n° 81, juillet 2015, La gestion durable du bâti agricole périurbain : gouvernance et enjeux locaux. Le cas des hameaux agricoles dans l'Hérault
Analyse n° 82, septembre 2015, Les antibiorésistances en élevage : vers des solutions intégrées
Analyse n° 83, septembre 2015, Évaluation du Plan Banane Durable 1 : résultats et perspectives
Analyse n° 84, septembre 2015, « Zéro défaut » ? La distribution des fruits et légumes et ses critiques comme révélateurs des transformations de l'agriculture
Analyse n° 85, novembre 2015, Diffusion au public des résultats des contrôles sanitaires officiels : enseignements d'une comparaison internationale
Analyse n° 86, décembre 2015, Les fermes laitières de polyculture-élevage : atouts et défis pour l'avenir
Analyse n° 87, décembre 2015, Communiquer sur la qualité sanitaire des aliments en France : enjeux et perspectives
Analyse n° 88, décembre 2015, L'avenir de l'installation dans la Nièvre : un exemple de prospective agricole
Analyse n° 89, mai 2016, Des scénarios prospectifs au service de l'élaboration d'une stratégie nationale : l'exemple du volet agricole des scénarios Énergie-Climat-Air
Analyse n° 90, mai 2016, L'agriculture familiale en France métropolitaine : éléments de définition et de quantification
Analyse n° 91, juin 2016, La gestion publique des questions agricoles en Australie
Analyse n° 92, juillet 2016, Les espaces-tests agricoles : expérimenter l'agriculture avant de s'installer

Tous ces numéros sont téléchargeables aux adresses suivantes :

<http://agriculture.gouv.fr/publications-du-cep>

<http://agreste.agriculture.gouv.fr/publications/analyse/>

Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt
Secrétariat Général

Service de la statistique et de la prospective

Centre d'études et de prospective

3 rue Barbet de Jouy

75349 PARIS Cedex 07

Sites Internet : www.agreste.agriculture.gouv.fr

www.agriculture.gouv.fr

Directrice de la publication : Béatrice Sédiillot

Rédacteur en chef : Bruno Héroult

Mel : bruno.herault@agriculture.gouv.fr

Tél. : 01 49 55 85 75

Composition : SSP Beauvais

Dépôt légal : À parution © 2016