

Clémence Laborde

Stolian Fayolle

La richesse en phosphore.

1) Introduction

Afin d'assurer une sécurité alimentaire mondiale, il est important que la production alimentaire et en particulier la production agricole puisse subvenir aux besoins d'une population toujours plus importante et qui pourrait atteindre les 9 à 10 milliards d'individus d'ici 2050. En effet, au lendemain de la seconde guerre mondiale, la croissance démographique croissante a contraint le mode agricole à améliorer ses performances agricoles. La "révolution verte", en se basant sur la mécanisation, l'apport massif d'intrant et la sélection de variétés productives et la sélection de variété productives, a permis de répondre à ces défis [2] et d'assurer une sécurité alimentaire dans les pays développés. Cependant, ce qui à été considéré comme une grande réussite entraîne aujourd'hui de nouveaux défis à relever.

L'utilisation massive d'intrants a perturbés les cycles biogéochimiques [1] et plus particulièrement, le cycle du phosphore a été particulièrement altéré par les activités humaines [4], provoquant, entre autres, une eutrophisation massive du milieu aquatique. De plus, la ressource en cet élément est limitée car sa production résulte de l'exploitation de roches phosphatées [4]. Ainsi, les réserves de phosphore sont estimées encore exploitables pendant 25 ans avant d'atteindre leurs limites (Stewart et al., 2005; Jasinski, 2008). Or, le phosphore est un élément essentiel au fonctionnement des cellules de part son importance dans la synthèse d'ADN et d'ATP et donc c'est un élément essentiel et non substituable pour la croissance des plantes en agriculture [3]. Ainsi, il devient important de changer de paradigme en intégrant le développement important des sociétés humaines et le maintien de la ressource planétaire. Plus particulièrement, il est nécessaire d'intégrer l'importance du phosphore dans le fonctionnement des écosystèmes ainsi que les limites liées à sa disponibilité afin de pouvoir assurer le maintien de l'agriculture et ainsi assurer la sécurité alimentaire [6].

Face à ces nouveaux défis, une seconde révolution verte s'annonce, proposant de nouvelles solutions.

Commentaire [LS1]: répétition

Commentaire [LS2]: pourquoi le 2 avant le 1 ??

Commentaire [LS3]: pour qui ?? attention cela peut être un a priori une réussite un échec est un jugement de valeur pour un acteur ou un groupe d'acteurs

Commentaire [LS4]: phrases à construire différemment

Commentaire [LS5]: la bibliographie doit être uniforme.

Commentaire [LS6]: L'usage du mot n'est pas problématique parce que sans doute employé par des acteurs mais il convient de le mettre entre guillemet car ici son sens n'est pas celui défini par Kuhn

Commentaire [LS7]: Très général je ne saisis pas bien le sens

Commentaire [LS8]: L'introduction est claire sur le plan des enjeux mais il serait pertinent de préciser en introduction où se situe la problématique.

Je ne connais pas les problèmes liés à l'exploitation du phosphore et aux « dérèglements de son cycle mais j'imagine comme toutes ressources que son exploitation est source d'une part de tensions sociales dans les lieux d'extraction et d'autre part de débat sur l'impact humain sur les cycles naturels.

2) Analyse

a) La ressource en phosphore

Historiquement, le phosphore naturellement présent dans le sol et l'addition, localement, de matière organique suffisait pour assurer les besoins de l'agriculture. Cependant, pour pallier à la demande croissante en denrées alimentaires, due à l'augmentation de la population mondiale, la production agricole a dû adapter ses pratiques et augmenter les apports en éléments nutritifs. Ces apports et plus particulièrement ceux en phosphore se sont effectués par le biais du guano, une ressource qui s'est rapidement révélé insuffisante, puis, plus tard, par des apports en roche phosphatée. C'est après la seconde guerre mondiale, que l'exploitation de roches phosphatées s'est massivement développée [9], durant, ce qui a été ~~appelé~~ "la révolution verte". Depuis cette période, la demande en phosphore n'a cessé d'augmenter. En effet, contrairement à l'azote que l'on fixe à partir de l'azote atmosphérique, les ressources de phosphore minéral sont limitées. En 2009, Cordell et collaborateurs [9] ont publié un article modélisant la production annuelle de roches phosphatées aux cours du temps et ont annoncé un pic de production comme celui qui avait déjà été calculé pour l'extraction d'hydrocarbure. Après ce pic prévu en 2033, la production annuelle devrait diminuer jusqu'à épuisement de la ressource. Bien qu'ayant eu un retentissement important, les conclusions de cette articles ont ensuite été contestées par la sortie du dernier rapport de l'United States Geological Survey (USGS) qui révisait à la hausse les quantités de roches phosphatés exploitables dans le monde. En particulier, les quantités disponibles au Maroc et au Sahara occidentale sont passées de 5.7 Gigatonnes à 51 Gigatonnes, soit 80% des réserves mondiales. Le modèle de Cordell et collaborateurs étant basé sur les données du précédent rapport, une nouvelle estimation de la date du pic de production a ~~été~~ calculée, le repoussant à 2070. Malgré tout, cette nouvelle estimation pourrait se révéler tout aussi biaisée que la précédente, car le rapport de l'USGS comporte des marges d'erreur importantes et l'estimation d'une quantité de ressource minière à l'échelle mondiale est une tâche complexe et très incertaine. De plus, le modèle proposé par Cordell et al. pourrait lui même se ~~révéler~~ imprécis, voir erroné. En effet de nombreux facteurs peuvent influencer la capacité de production: les acteurs internationaux (états, exploitants...), le développement de nouvelles techniques d'extraction, la découverte de nouveaux filons. Le pic de production pétrolière par exemple n'a cessé d'être reculé les années passant.

Cependant, contrairement au pétrole, le phosphore minéral est une ressource qui ne peut être substituée car c'est un élément indispensable à plusieurs procédés essentiels au

Commentaire [LS9]: L'analyse présentée est construite et cohérente mais ne fait pas ressortir suffisamment distinctement les enjeux sur le plan social, économique, etc. et ceux liés aux débats scientifiques.

Il apparaît un déficit d'explication sur la portée sociale de l'usage et l'exploitation du phosphore.

En ce sens en introduction il semblerait judicieux de présenter les enjeux d'autres cycles comme celui de l'Azote par exemple étroitement lié à l'exploitation agricole aussi.

Si l'intervenant n'a pas développé ces aspects, il convient pour cerner le problème d'élargir l'analyse.

Commentaire [LS10]: Police à uniformiser

fonctionnement des organismes vivants (production d'énergie, ADN, paroi cellulaire...). La quantité de phosphore présente dans un sol et, plus particulièrement, la fraction inorganique utilisée par les plantes est un déterminant essentiel de sa productivité. De plus, n'étant pas renouvelable, le phosphore inorganique s'épuise progressivement dans les écosystèmes naturels par érosions et par le prélèvement de matière organique. L'apport de fertilisant durant la révolution verte a permis le maintien d'importante quantité de phosphore dans les sols des pays développés et plus récemment des pays émergents. Ce n'est pas le cas des pays du tiers-monde dans lesquels, l'acquisition de fertilisant par les agriculteurs requiert un investissement financier important et on peut aujourd'hui observer de fortes inégalités dans la répartition du phosphore inorganique dans les sols mondiaux.

Le débat sur les ressources de roches phosphatées a du mal à atteindre la sphère publique car les populations y sont beaucoup moins sensibles. De plus, certains acteurs comme les principaux producteurs réfutent l'épuisement des réserves mondiales. En effet, cela pourrait encourager le développement d'alternatives comme on peut l'observer aujourd'hui avec les énergies fossiles. D'autant plus que l'exploitation des roches phosphatées est une activité polluante qui génère d'énorme quantité de déchets (5t pour 1t de roches) et que les roches contiennent souvent des radionucléides ou des métaux lourds comme le cadmium. En attendant de nouvelles solutions, le risque d'une production à deux vitesses où les paysans des pays pauvres ne fertilisent pas leurs sols ou à l'aide de produits de seconde qualité est une hypothèse plausible.

b) La seconde révolution verte

Face à l'épuisement progressifs des ressources de roches phosphatées, une seconde révolution verte est en cours. En effet, lors de la première, la notion d'un épuisement des ressources n'était pas prise en compte et le but était alors d'augmenter la production, par l'apport massif de fertilisants et par la sélection de génotypes hyper performants. Ce qui a résulté en un système ultraproductif dans les pays occidentaux et a permis de soutenir l'importante augmentation de la population. Mais ce système s'est aussi révélé inadapté aux sols pauvres en phosphore et peu fertilisés des pays pauvres tels que ceux que l'on retrouve en Afrique sub-saharienne.

En effet, la révolution verte s'est faite dans un paradigme de sélection de variétés hyper performantes en présence de grandes quantités de fertilisants. Dès lors les traits sélectionnés chez ces espèces étaient ceux permettant une croissance maximale dans des conditions optimales. Malheureusement, dans une optique de production sous de faibles concentrations de phosphore inorganique, la production de

Commentaire [LS11]: Si le sens de paradigme est ici mobilisé scientifiquement il convient de préciser la communauté de chercheurs y adhérant

Commentaire [LS12]: Jugement de valeur à éviter

ces super~~s~~ géotypes ~~se~~'est réduite de beaucoup. Sans fertilisation phosphatée, les plantes rencontrent deux obstacles majeurs à l'~~aquisition~~~~acquisition~~ de phosphore :

- Le phosphore n'est pas toujours accessible car il est retenue par les ions ferreux du sol ce qui le rend difficile à récupérer, c'est donc un coup pour la plante.
- De par sa fixation avec les éléments ferreux, le phosphore ~~inorganique~~ est très peu mobile (1-2mm) et ~~nécessitenécessite~~ donc la prospection d'un volume de sol important par les racines, ce qui représente un deuxième coup énergétique pour la plante.

Commentaire [LS13]: L'orthographe devient de plus en plus aléatoire

Commentaire [LS14]: Préciser inorganique pour un chimiste cela n'a sans doute pas le même sens que celui exprimée dans la phrase ? matière carbonée ou non ?
Ma remarque est une remarque de néophyte

L'énergie est alors ~~alouée~~~~allouée~~ dans la partie racinaire de la plante plutôt que dans la production des organes d'~~intérêts~~~~intérêts~~ économiques (les feuilles, la tige, les fruits ou les organes de stockage).

Pour faire face au risque d'épuisement des réserves de phosphores et pour améliorer la sécurité alimentaire des pays pauvres, une partie de la recherche se porte aujourd'hui sur l'identification et la sélection des traits et des géotypes permettant d'augmenter la productivité des plantes sur les sols pauvres. C'est ce qui a été fait pour le riz aux Philippines ou une variété beaucoup plus performante sur sol pauvre que la variété la plus commercialisé au monde (nipponbare) a été produite par croisement avec des variétés locales. Cette ~~expèrience~~~~expérience~~ a permis de montrer que de faible variations de l'ordre de 20 à 30% de certains traits pouvait entrainer une augmentation de 200% de l'acquisition de phosphore par la plante. ~~Parmis~~~~Parmi~~ ces traits, les plus prometteurs sont aujourd'hui :

- La surface spécifique racinaire, une surface racinaire importante pour une masse faible permet une exploration plus importante du sol. Ce trait met en évidence l'importance des poils racinaires dans l'exploration du sol.
- L'efficacité externe d'absorption ou la quantité de phosphore absorbé par unité de ~~srufaces~~~~surface~~ racinaires. Car les plantes modifient leur environnement et rejette des exsudats pouvant améliorer leurs capacité à capter le phosphore.
- La mycorhisation des racines qui augmente le volume de terre exploré

La seconde révolution ~~verte~~ est en cours aujourd'hui et vise à ~~séléctionnersélectionner~~ de ~~nouvel-variété~~~~nouvelles variétés~~ et à intensifier la production avec des concentrations en phosphore beaucoup plus faibles. Ces variétés sont généralement moins efficaces en conditions optimales que les variétés déjà répertoriée comme nipponbare. En France, une nouvelle variété doit être ~~tésté~~~~testé~~ et être plus performante que les ~~variétésées~~~~variétés~~ déjà présentes dans le catalogue. Cependant, les tests des variétés se font en conditions de

Commentaire [LS15]: Voir remarque faite en introduction.
Ajouter dans l'intro une phrase d'explication pour définir ces termes

ressources non limitantes, ce qui **désavantages**désavantage les variétés **developpés**développées pour des milieux non optimaux.

3) Conclusion

La révolution verte s'est faite à une époque où la conscience de l'impact de l'homme sur son **environnement**environnement et de la limitation des ressources disponibles n'étaient alors qu'à un état embryonnaire dans la conscience collective. De plus c'était aussi une époque où la **décolonisations**débutée tout juste, tout comme la division du monde entre occidentaux et tiers monde. Elle a permis l'**essor**essor de la population et le **développement**développement d'un niveau de vie élevée à « l'occidentale » en réutilisant à des fins civiles, des technologies militaires, ce qui peut être considéré comme une grande réussite et a sûrement provoqué une grande satisfaction. La révolution verte a cependant mené au développement de stratégies d'exploitation des ressources et de variétés agricoles inadaptées à la réalité et à la diversité du monde dans lequel nous vivons. Aujourd'hui, les scientifiques ont pris conscience du problème et progressivement les sphères publiques suivent. Une seconde révolution verte est en cours et tente de prendre en compte les besoins divers des populations du monde. Si le **développement**développement concret de méthodes de récupération des pertes et d'optimisation de l'utilisation de la ressource phosphate se **développent**développent en théorie, il reste difficile de les **mettre**mettre en pratiques car cela demande une volonté politique forte. Pourtant le phosphate est aujourd'hui considéré par l'Europe comme une ressource **à risque** et reste la **seule** ressource agricole à être considérée comme telle.

Commentaire [LS16]: Dans votre conclusion, il serait judicieux de faire apparaître ce que vous vous en pensez ??? La science « du phosphore » est-elle aussi efficace à résoudre les problèmes sociaux énoncés ? Les solutions techniques autour du phosphore sont-elles un « remède » à la faim dans le monde N'y a-t-il pas des problèmes environnementaux sous-jacents ? L'extraction du phosphate est-elle sans problème social ? Une vision positiviste de la science présente cette dernière sous un jour sans doute trop beau. Qu'en pensez-vous ? N'y a-t-il pas des problèmes sanitaires ? Je pense à la prolifération par exemple des algues vertes... L'économie semble jouer un rôle mais quelle est son influence sur l'activité scientifique ? Pensez-vous que l'économie doit primer ou non comme une solution ou existe-t-il des solutions économiques moins rentables mais sur le plan environnemental plus efficace ?

Commentaire [LS17]: ??

Commentaire [LS18]: Pourquoi

Bibliographie

- [1] Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E., ... Foley, J. (2009). Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, 14(2). <https://doi.org/10.5751/ES-03180-140232>
- [2] Lynch, J. P. (2007). Turner review no. 14. Roots of the second green revolution. *Australian Journal of Botany*, 55(5), 493–512. <https://doi.org/10.1071/BT06118>
- [3] Gamuyao, R., Chin, J. H., Pariasca-Tanaka, J., Pesaresi, P., Catausan, S., Dalid, C., ... Heuer, S. (2012). The protein kinase Pstol1 from traditional rice confers tolerance of phosphorus deficiency. *Nature*, 488(7412), 535–539. <https://doi.org/10.1038/nature11346>

[4] Van Vuuren, D. P., Bouwman, A. F., & Beusen, A. H. W. (2010). Phosphorus demand for the 1970-2100 period: A scenario analysis of resource depletion. *Global Environmental Change*, 20(3), 428–439. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.04.004>

[5] Jaramillo, F., & Destouni, G. (2015). Comment on “Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet.” *Science*, 348(6240), 1217–1217. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9629>

[6] Scholz, R. W., Ulrich, A. E., Eilittä, M., & Roy, A. (2013). Sustainable use of phosphorus: A finite resource. *Science of the Total Environment*, 461–462, 799–803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.043>

[8] FAO (2002) ‘The state of food insecurity in the world 2002.’ (The Food and Agriculture Organisation of the United Nations: Rome)

[9] Cordell, D., Drangert, J. O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2), 292–305. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>