

La synthèse industrielle des engrais azotés dépense-t-elle plus d'énergie que les symbioses légumineuses-rhizobium ?



L. JORDAN-MEILLE, M. JOUMAS, M. GENIAUX, P. VINCENT

Enseignant-chercheur à Bordeaux Sciences Agro, j'enseigne la nutrition minérale des plantes, et effectue ma recherche au sein de l'UMR BSA-INRA ISPA sur le rôle joué par la nutrition potassique sur les capacités des plantes à résister aux stress hydriques. Ce sujet sur le coût énergétique de la nutrition azotée est un petit divertissement auquel des étudiants ont largement contribué.

Objectif et contours de l'étude

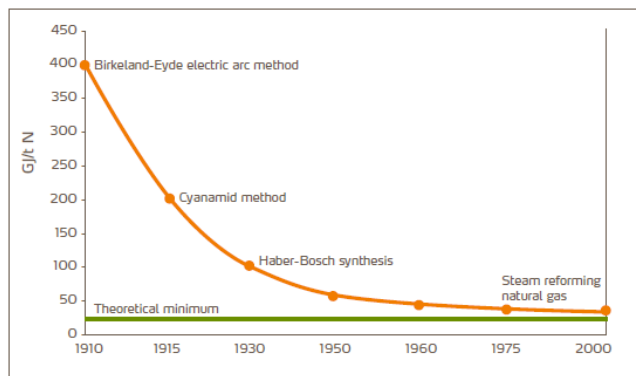
Cette étude, purement bibliographique, tente de quantifier l'énergie consommée pour la nutrition azotée des plantes en comparant le cas d'une plante alimentée par un engrais de synthèse et celui d'une légumineuse qui tire son azote des symbioses bactériennes. Afin de faciliter la démarche comparative, on se restreint à l'assimilation ammoniacale, forme commune issue des processus industriels et biologiques. Les auteurs de cette étude sont conscients que l'application d'ammoniac agricole a été stoppée en France du fait de la dangerosité potentielle de la manipulation d'ammoniac, (voire du risque de toxicité ammoniacale). Néanmoins, l'introduction dans notre raisonnement de nitrates de synthèse compliquerait inutilement les comparaisons, nous poussant par exemple à devoir calculer les coûts énergétique de leur réduction dans les feuilles, etc. ... Le "périmètre" pris en compte va de la transformation du di-azote de l'atmosphère, jusqu'à l'absorption d'ammonium par les racines. Le bilan d'énergie s'arrête à l'absorption ammoniacale, son transport et ses éventuelles transformations dans la plante n'étant pas discriminantes.

Energie requise par les procédés industriels

La méthode d'évaluation de la consommation liée à la production des engrais se base sur les équations des processus chimiques liés au procédé F. Haber et C. Bosch. Ces chimistes ont mis au point, voilà un siècle (prix Nobel de chimie en 1918 et 1931) la synthèse à l'échelle industrielle des engrais azotés à partir de l'azote moléculaire de l'air, réduit en ammoniac, en présence de méthane et d'eau, selon l'équation :



Ainsi, la quantité théorique de méthane pour produire 1 kg de N sous forme NH_3 (N-NH_3) est de 503g CH_4 . Compte tenu de l'énergie libérée par la combustion du méthane (56 kJ g^{-1}), la synthèse – théorique – d'une tonne d'ammoniac nécessite 28 GJ. Aujourd'hui, les meilleurs procédés permettent d'atteindre $40 \text{ GJ tonne}^{-1} \text{ N-NH}_3$, ce qui constitue un énorme progrès depuis la découverte du procédé, où l'énergie requise était de l'ordre de $100 \text{ GJ tonne}^{-1} \text{ N-NH}_3$. Depuis cette époque, la dépense énergétique a été largement abaissée grâce à un recyclage maximal de l'énergie et des gaz perdus au cours des réactions, également connu sous le terme de "reformage" à la vapeur de l'ammoniac ou "Steam Reforming Natural Gas" (BAT 2000). L'acheminement de l'engrais vers les parcelles et son épandage consomment respectivement 1 et $3 \text{ GJ tonne}^{-1} \text{ N-NH}_3$ (Yara). Au total, ce sont donc **44 GJ tonne⁻¹ N-NH₃** nécessaires pour synthétiser et déposer l'azote ammoniacal au voisinage des racines.

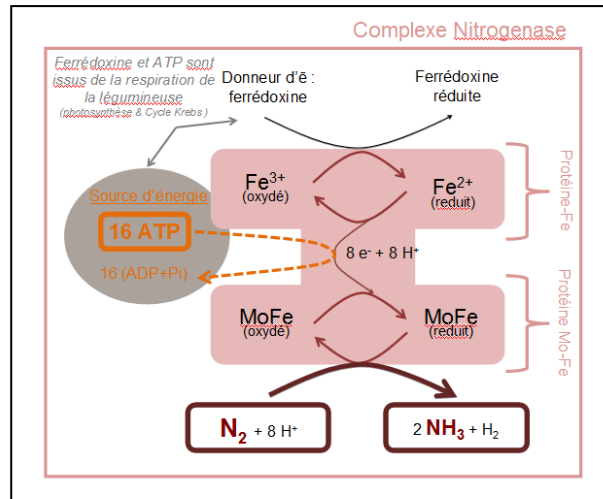


Energie requise par les procédés biologiques : approche physiologique

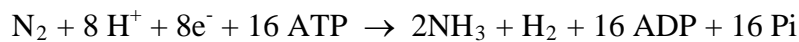
La production d'ammoniac NH_3 à partir du diazote atmosphérique N_2 va être réalisée par le système enzymatique du complexe nitrogenase présent dans les bactéries.

L'enzyme nitrogenase est composée de deux sous-ensembles protéiques :

- la sous-unité Fer (de nature réductase) qui une fois réduite par des transporteurs mobiles d'électrons est de type Ferrédoxine.
- la sous-unité Fer-Molybdène (de nature nitrogenase) qui catalyse la réduction du N_2 en ammoniac NH_3 mais aussi la réduction des protons H^+ en hydrogène H_2 .



Au cours de la réaction, la réduction de la sous-unité Fe va permettre le transfert de 8 électrons jusqu'à la protéine MoFe grâce à un processus d'hydrolyse de l'ATP. Deux ATP sont hydrolysés par transfert d'électrons. L'équation générale de réduction du N_2 est (Salsac *et al.* 1984, Elmerich 1997, Sprent 1990) :



Le coût énergétique théorique de 8 ATP par mole de NH_3 produite est en réalité plus important du fait d'un recyclage partiel du H_2 produit, entraînant plutôt une dépense moyenne de 10 ATP par mole de NH_3 produite (Schubert et Evans 1976). Sachant que l'hydrolyse d'une mole d'ATP libère (ΔG°) 30,5 kJ, on en déduit que la consommation d'énergie par la symbiose *Rhizobium / Fabacées* est de **22 GJ tonne⁻¹ N-NH₃**. A cette dépense énergétique liée au fonctionnement de la nitrogenase s'ajouterait une quantité au moins équivalente pour l'entretien des nodosités (Deroche 1983).

Discussion

Concernant la réaction *sensu stricto* de transformation du di-azote en ammoniac, le meilleur taux revient aux processus biologiques. Howard et Rees (1996) attribuent cette meilleure performance à un degré de sophistication plus poussé des processus chimiques dans le cas des symbioses, imposé par des conditions de températures (20°C) et de pression (0.8 atm) ambiantes, très loin des conditions recherchées lors des processus industriels (température de 500°C et pression de 250 atm). Cependant, si l'on prend en compte le fonctionnement global, incluant l'entretien des nodosités, la dépense énergétique "naturelle", issue des produits de la photosynthèse, est supérieure à celle issue des procédés industriels, néanmoins issue de matières non renouvelables (méthane). Ce coût d'énergie pour la légumineuse est confirmé par son rendement deux fois plus faible : la "perte" de 40 qtx de MS / ha (soja vs blé) pour fixer 400 kg de N équivaut à dépenser 200 GJ / tonne de N prélevé !

Bibliographie

- BAT 2000 Best Available Techniques for pollution prevention and control in the European fertilizer industry.
Deroche M.E. 1983 Relations entre la photosynthèse et l'assimilation de l'azote. Bull. Soc. Bot. Fr. 130, 85-98
Elmerich C. 1997. Nitrogénase : aspects biochimiques, moléculaires et génétiques. In Assimilation de l'azote chez les plantes, INRA Ed., 163-178
Howard J.B et Rees D.C. 1996. Structural Basis of Biological Nitrogen Fixation . Che. Rev, 96, 2965–2982
Schuber K.R. et Evans H.J. 1977. The relation of hydrogen reactions to nitrogen fixation in nodulated symbionts. In Recent Developments in Nitrogen Fixation, Ed Newton, 469-85
Sprent J.I., Sprent P. 1990. Nitrogen fixing organisms : pure and applied aspects. Ed Chapman and Hall
YARA, Important questions on fertilizer and the environment. Document de communication.