



ROYAUME DU MAROC  
ACADÉMIE HASSAN II DES SCIENCES ET TECHNIQUES

# LES IMPLICATIONS ÉCONOMIQUES DU RÉCHAUFFEMENT GLOBAL

Conférence donnée lors de la tenue de la session plénière solennelle 2017  
par :

***Daniel NAHON***  
*Professeur émérite, Aix-Marseille Université, France*

Rabat, le 22 février 2017

Dépôt légal : 2018MO0241  
ISBN : 978-9954-9894-1-8

Réalisation : **AGRI-BYS S.A.R.L.**

Achevé d'imprimer : janvier 2018  
Imprimerie Lawne : 11, rue Dakar, Océan, 10040-Rabat, Maroc



**Sa Majesté le Roi Mohammed VI - que Dieu Le garde -  
Protecteur de l'Académie Hassan II  
des Sciences et Techniques**



## Introduction

Dans les décennies à venir, le réchauffement climatique global, en s'amplifiant, entraînera de grandes modifications physiques, géographiques, biologiques, sociales. Ses principaux effets attendus sont :

- (i) la modification du régime et de la répartition des précipitations,
- (ii) un réchauffement plus important des terres que celui des océans,
- (iii) une fonte partielle et peut-être à terme totale de la banquise,
- (iv) une montée du niveau des mers qui vient en corollaire,
- (v) une profonde modification des écosystèmes régionaux et globaux.

Et cela aura plusieurs implications qui contrôleront le développement économique des sociétés du XXI<sup>e</sup> siècle.

Les implications que l'on peut déjà pressentir sont celles qui toucheront l'agriculture, la pêche, l'énergie et notamment les combustibles fossiles, les équipements des territoires (villes, routes, barrages,...), le tissu industriel, les minerais exploités pour l'économie verte qui s'ouvre au monde, les emplois, les flux migratoires de populations humaines et animales mais aussi à terme végétales, la santé humaine. Tous ces secteurs touchés auront entre-eux de nombreuses rétroactions qu'il paraît difficile de cerner de nos jours. Mais les rendements agricoles seront touchés et il est urgent de «re-calibrer» l'agriculture pour faire face à la dérive économique qui en résultera. C'est le principal sujet de cette intervention et indirectement lié l'exploitation à venir des minerais qui seront nécessaire au lancement de l'économie verte qui prend le relais.

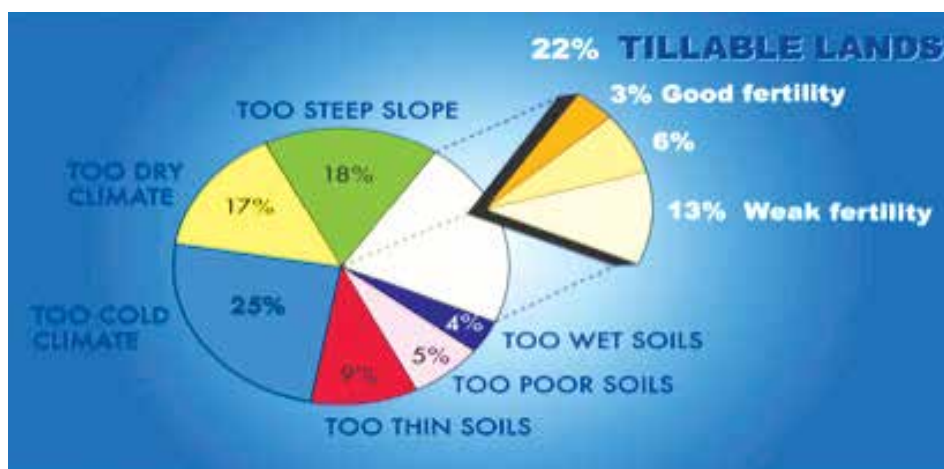
L'agriculture dépend avant tout d'une ressource naturelle qui n'est pas renouvelable à l'échelle humaine : le sol. Et le sol, support de toute l'agriculture est un système global dont dépendent : la nutrition des humains, des animaux, des végétaux ; la biodiversité qu'il contient ; l'eau douce continentale ; le climat ; les paysans et le monde rural en général. Et ***l'économie de l'agriculture n'a jamais su être évaluée à sa juste valeur car l'exploitation intensive et extensive des terres à des fins agricoles a un coût environnemental, un coût énergétique et un coût humain !***

Ce sont ces coûts qui sont déterminant sur l'impact économique et que nous allons passer en revue.

Le Coût environnemental : le sol (argile et nutriments), l'eau douce (irrigation), la biodiversité, le climat.

## 1. Le sol arable

Sur les 14,84 milliards d'hectares de terres émergées, en tenant compte des surfaces recouvertes de glace, de sables vifs, de roches à nu, de lacs ou mers intérieures, les sols en eux mêmes ne couvrent qu'environ 11,5 milliards d'hectares (75%) dont seulement 2,5 milliards sont arables. Pas plus, pas moins ! Les sols dans leur plus grande part ne sont donc pas cultivables car situés dans des zones trop en pente, dans des régions trop froides, voire glacées (permafrost), dans des aires trop arides, trop humides, ou tout simplement parce que les terres sont trop pauvres ou trop peu épaisses.



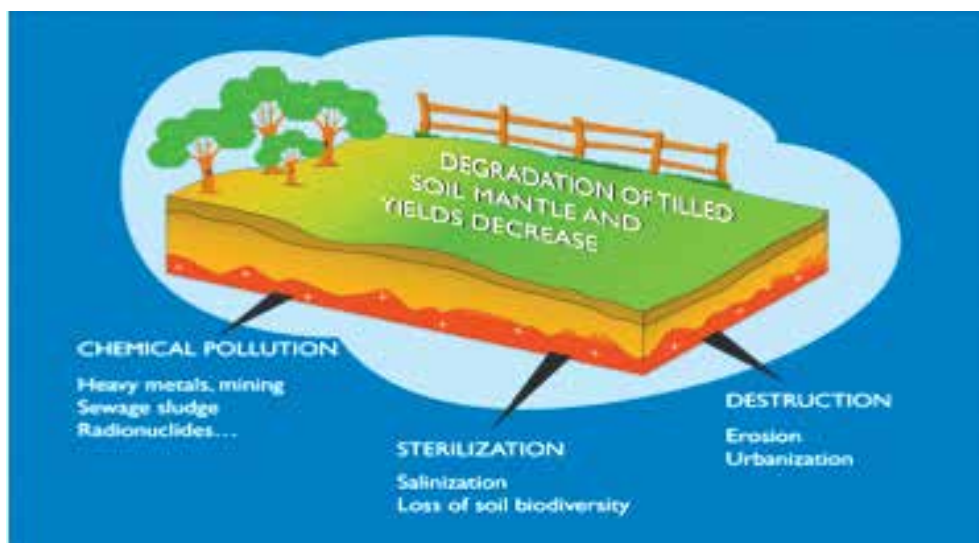
22% seulement des terres sont arables

2500 millions d'hectares, c'est peu : environ 50 fois le territoire français. Ajoutons 3500 millions d'hectares utilisés pour le pâturage mais dont les sols sont trop peu épais pour les livrer à la culture. Et déjà près de 1600 millions d'hectares sont cultivés, parmi lesquels 70 millions sont dévolus aux biocarburants, 300 millions d'hectares sont irrigués dont 50 millions devenus inexploitable par salinisation excessive.

Bien plus, ce sont chaque année pas moins de 8 millions d'hectares de terres arables qui sont soustraites par maltraitance, par destruction, par ignorance : 6 millions d'hectares sont ainsi abandonnés par perte de fertilité suite à la déforestation, à l'érosion, à la salinisation,... et 2 millions sont perdus par urbanisation (Nahon, 2012). À l'évidence le sol n'est pas une ressource renouvelable à l'échelle humaine : sa vitesse de formation se mesure en dizaines de millénaires et pour les plus épais situés dans les zones humides tropicales en centaines de milliers d'années, ce qui en fait les plus fragiles alors que les «réserves» en terres arables se situent dans ces régions. La terre féconde s'épuise sous nos yeux !

Les sols cultivés sont soumis à des dégradations qui sont l'œuvre de la négligence humaine dans leur utilisation. La pollution chimique (par métaux lourds, par déchets, par radionucléides...), la stérilisation (par salinisation excessive, par perte de la biodiversité) ou la destruction (par érosion ou par urbanisation) sont autant de problèmes qui affectent les terres arables au point de craindre que l'humanité manquera de sols pour nourrir les populations.

Nous ne verrons ici que trois aspects de ces problèmes : **l'érosion, l'urbanisation, la perte de biodiversité. Car ce sont eux qui sont responsables de la baisse de la production.**



Dégradation du manteau du sol labouré et diminution des rendements

### **L'érosion des terres arables**

La structure du sol le protège de l'érosion par le vent et la pluie. Mais il suffit de labourer profondément un sol arable pour que cette structure soit détruite, livrant la partie supérieure du sol à l'érosion linéaire par ruissellement des eaux de pluie. Le labour est aidé en cela par les lourds engins de travail de la terre qui écrasent les petits agrégats argileux structurant le sol, compactent les premiers décimètres de surface et empêchent l'eau de pluie d'y pénétrer. Le ruissellement ainsi favorisé parcourt la surface du sol, prend de la vitesse et incise la terre en rigoles ou chenaux d'érosion.



Erosion du sol par mauvaise exploitation agricole (labours)

Et si le labour est dans le sens de la pente, il accentue considérablement la vitesse d'érosion entraînant l'argile nourricière chargée de nutriments minéraux et de matière organique. Le sol se défait ainsi de sa fertilité naturelle qu'il faudra compenser par un apport considérable d'engrais chimiques. Ces derniers ne seront pas tous puisés par la végétation et une quantité non négligeable d'entre eux seront entraînés au prochain orage avec l'argile vers les rivières en les polluant et en remplissant leur lit de sédiments. Ce qui favorisera désormais les inondations catastrophiques qu'on connaît en milieu rural.

Les sols arables sont donc soumis, par leur mauvaise exploitation agricole (labours), à une érosion considérable. À titre d'exemple alors que l'érosion naturelle moyenne à la surface du globe est inférieure à 0,5 tonne par hectare et par an (0,5t/ha/an), on considère que les sols labourés ont une érosion comme suit : supérieure à 20t/ha/an pour 20% d'entre eux, entre 7,5t/ha/an et 20t/ha/an pour 50% des sols cultivés et inférieure à 7,5t/ha/an pour seulement 30% de ces sols (White, 2006). Et si on considère sur un paysage plat un sol convenablement exploité si bien que l'érosion le concernant n'est que de l'ordre de 3t/ha/an, cela correspond tout de même à un appauvrissement de la fertilité avec une perte de 25kg/ha/an de carbone organique, de 10kg/ha/an d'azote organique, de 3kg/ha/an de Phosphore, de 10 kg/ha /an d'ions échangeables (potassium, sodium, calcium, magnésium, oligoéléments..., et si ce sol est amendé et traité, ce qui est le cas de la presque totalité des sols arables des régions tempérées, la perte en engrais est de 10 à 25%t/ha/an et en pesticides de 30%. On considère que la perte globale annuelle des sols arables en carbone organique minéralisé en CO<sub>2</sub> est de deux milliards de tonnes (2Gt).

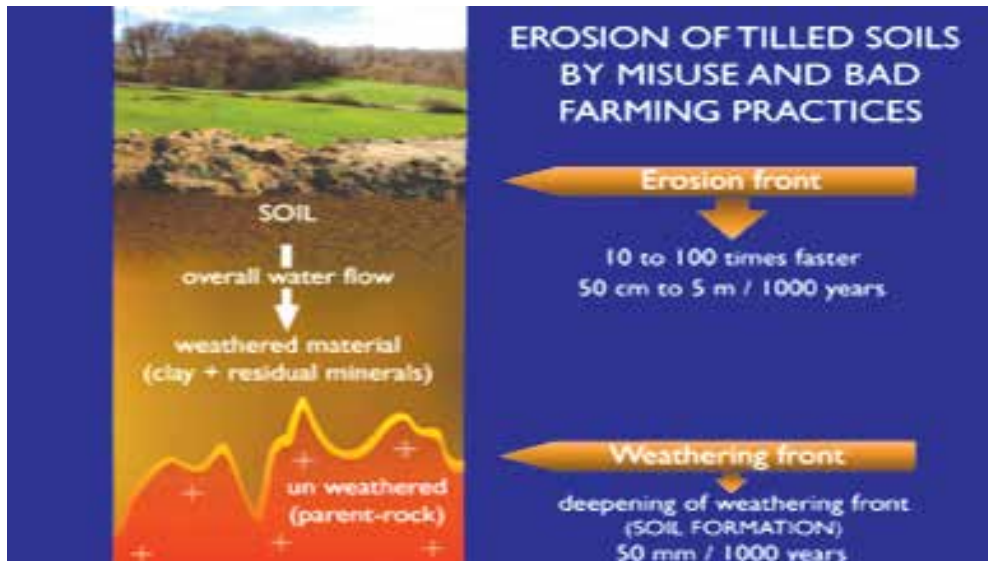
L'érosion n'intervient pas seulement pour diminuer la fertilité du sol, mais peut également conduire à sa destruction, en particulier dans les zones tropicales où les coupes à blanc des forêts pour servir l'extension des terres agricoles, l'érosion peut atteindre des chiffres records de 200t/ha/an.





Déforestation dans les zones tropicales qui peut entraîner la destruction du sol

D'une manière générale l'érosion entame la surface du sol (ce qu'on appelle le front d'érosion) de 0,5 à 5m chaque millénaire, alors que l'approfondissement biogéochimique du sol au dépens de la roche sous jacente (roche mère), c'est-à-dire la formation du sol est de 0,05m pour 1000 ans. Ce qui veut dire qu'en moyenne l'érosion actuelle des sols arables progresse de 10 à 100 fois plus vite que ne se régénère le sol. Le capital des terres arables se dégrade ! Et il me semble que c'est là la toute première priorité de l'agriculture.



L'érosion actuelle des sols arables progresse de 10 à 100 fois plus vite que ne se régénère le sol

## L'urbanisation

De même l'urbanisation est responsable de la destruction de superficies considérables de sol arable. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, 14% de la population mondiale vivait dans les villes contre 54% au début du XXI<sup>e</sup> siècle. Et la tendance est à l'augmentation rapide des citadins avec plus de 5 millions de nouvelles personnes qui s'installent chaque mois dans les espaces urbains d'Asie, d'Inde, d'Amérique centrale et du Sud, d'Afrique, cinquante fois plus que dans les villes des pays industrialisés. On estime que chaque seconde ce sont 100m<sup>2</sup> de terres cultivées qui disparaissent par urbanisation aux États-Unis d'Amérique (Genske, 2003) et 500m<sup>2</sup> en Chine ou au Brésil. Chine et USA, développent leur surface urbaine en consommant chaque année une superficie de terres arables équivalente à cinq fois celle du Danemark ! Bien d'autres causes de réduction des surfaces arables existent ; nous renvoyons le lecteur à de nombreuses publications qui traitent cela en détails.

## 2- La Biodiversité

Les conséquences directes de l'érosion mais aussi de la maltraitance des sols cultivés par l'utilisation souvent abusive et généralisée de pesticides et d'engrais sont une diminution importante de la biodiversité de «l'ombre», celle que l'argile du sol abrite.

La matière organique du sol est constituée à la fois par tous les organismes et microorganismes vivants animaux et végétaux et par leurs cadavres et leurs débris qui s'accumulent à leur mort, étant eux mêmes décomposés par des bactéries et des champignons qui s'en nourrissent tout en libérant le carbone, l'azote, le phosphore, le soufre et tous les autres éléments que contenaient végétaux et animaux de leur vivant. Une partie de ces éléments chimiques peut s'ancrer sur et dans les argiles. Une autre partie s'organise en molécules directement assimilables par les racines des plantes.



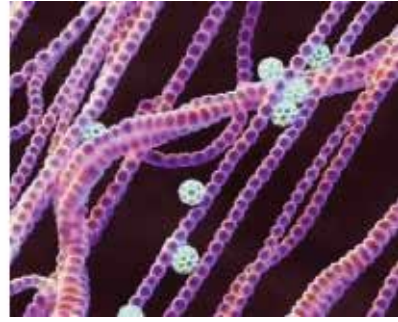
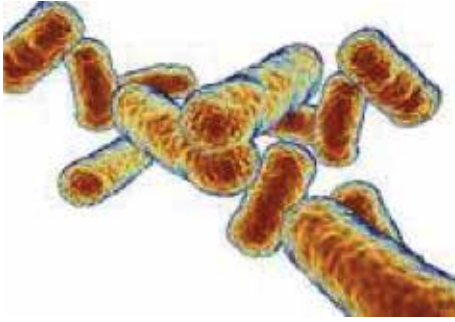
Les vers de terre: 10 millions/ha dans le sol des prairies  
consommant 90 t de matières organiques/ha/an

La matière organique est plus labile. À l'origine de la litière, les végétaux qui, au fil des jours et des années, livrent d'énormes quantités de débris, feuilles, branches, tiges. Eux-mêmes, comme tout organisme vivant, viennent à mourir sur place. Et tout ce petit monde s'amoncelle sur le sol et y pourrit doucement pour disparaître de notre vue assez rapidement et constitue l'humus noir du sol. Mais à la saison suivante, tout recommence.

Qu'est-ce qui fait pourrir ces débris de plantes et comment sont-ils incorporés dans le sol? La diversité des créatures vivantes du sol est pour l'essentiel responsable de la fragmentation, de l'incorporation, de la dégradation de la matière organique. En quelque sorte un recyclage naturel et continu, indispensable pour que la vie elle-même, animale et végétale, puisse se perpétuer. On estime que le poids des organismes vivant dans le sol serait de l'ordre de 6 à 8 tonnes par hectare.

Bien des sols sont épuisés d'avoir été exploités sans retenue, à renfort d'engrais et de pesticides. Leur fertilité pourrait reprendre des couleurs grâce aux vers de terre, à en juger les résultats obtenus sur la production du thé de l'État de Tamil Nadu en Inde par des chercheurs de l'université Pierre et Marie Curie et de l'université de Sambalpur. «Depuis une dizaine d'années, la production des plantations de thé stagnait malgré l'utilisation croissante d'engrais et de pesticides. Après quatre-vingts ans de culture intensive, les sols étaient dégradés, ayant perdu une bonne partie de leur humus. En désespoir de cause, des vers de terre d'une espèce commune, très répandue dans les régions tropicales, ont été introduits sur plusieurs plantations avec leur nourriture : des résidus de la taille des théiers et du compost. Le résultat fut spectaculaire. Après trois ans seulement, la production des feuilles de thé a augmenté de 35% à 240%, et la rentabilité des exploitations s'est accrue de 28% à 260%».

En creusant la terre, qui se soucie de ce micro monde qui pullule et qui reçoit tous nos déchets, tous nos oublis? Il est ignoré de tous ou presque, je pense notamment aux scientifiques qui leur consacrent leur vie. Et pourtant, c'est la moindre des choses, car que serait la vie et sa diversité sans lui? Nous respirons et nous digérons grâce à lui, et les plantes aussi. La terre féconde regorge de bactéries, d'actinomycètes, de champignons, d'algues, de protozoaires, dont la taille de chaque individu est inférieure au micromètre. La plupart d'entre eux se tapissent dans les 30 cm supérieurs du sol, là où leur nourriture abonde, car ils s'alimentent du carbone des débris végétaux et animaux morts. Le carbone n'est pas perdu pour tous ! Si ces microorganismes n'existaient pas, la Terre serait jonchée de cadavres.



Biomasse microbienne: bactéries, actinomycètes, champignons, algues, protozoaires... Contrôle du cycle d'azote et de carbone

Parmi eux, les bactéries (auxquelles nous associons les actinomycètes) ont dans le sol une activité prépondérante. Bien sûr, nous verrons aussi que le rôle des champignons filamenteux, les pseudo-mycéliums, est comparable à celui d'une assistante sociale pour mettre en communication de bonne entente les végétaux entre eux.

Les bactéries s'adaptent aux variations de leur environnement de façon impressionnante. Elles existent depuis des milliards d'années et seront encore là bien après les hommes. Elles ont accompagné le développement de la vie sur notre planète. Certains organes des cellules des êtres vivants (animaux, végétaux et humains) qui nous permettent de respirer, ne sont rien d'autre que des restes de bactéries ingurgitées par les espèces vivantes et dont le matériel génétique a été mis en commun pour le plus grand bien de l'évolution.

Chaque gramme de sol contient plus d'un milliard de bactéries et ce chiffre est multiplié par 10 lorsqu'on se rapproche d'une racine de plante. Il existe de très nombreuses espèces de bactéries, des dizaines de milliers, vivant en colonies pour mieux résister, mieux s'adapter aux variations répétées, discontinues, des conditions de milieu ; car l'union fait la force, ou autrement dit, le multiple n'est pas l'addition du simple, il est plus, il permet à d'autres forces nouvelles de s'individualiser, de se révéler. La mise en réunion de ces bactéries, leur permet de se nourrir et de se spécialiser aux produits fournis par la matière vivante : carbone, azote, phosphore, oxygène... dans lesquels elles puisent leur énergie.

Certaines bactéries peuvent même, en émettant des substances acides, dissoudre des minéraux pour libérer leur phosphore, le rendant disponible pour les plantes; nous reviendrons sur les cycles de l'azote et du phosphore plus avant dans cet ouvrage, mais afin de bien souligner le rôle irremplaçable des bactéries, abordons en premier le devenir du carbone organique.

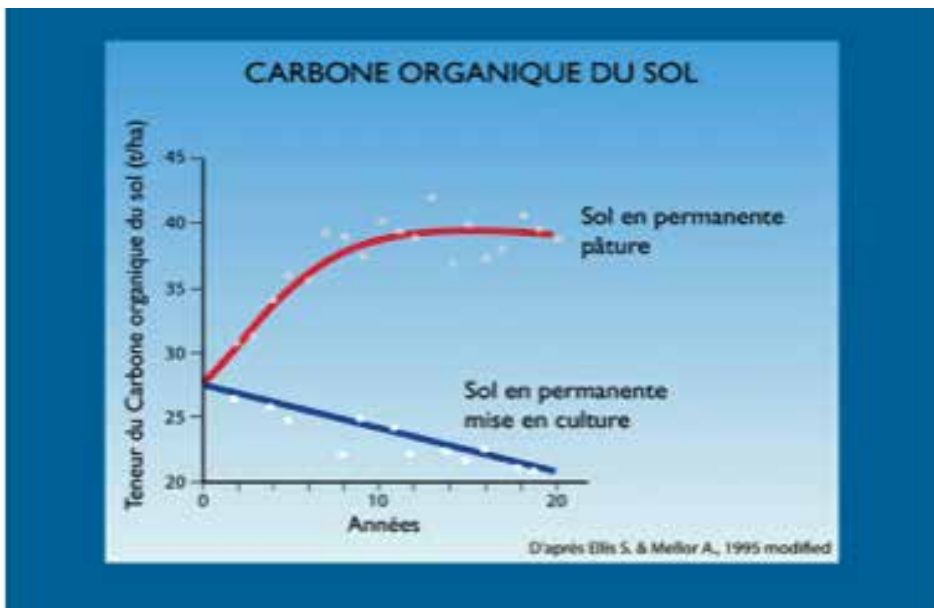
Les débris organiques végétaux qui s'accumulent dans la litière sont fragmentés par l'activité de la faune qui y réside, dont les lombrics. Les bactéries viennent y cueillir l'énergie et les nutriments dont elles ont besoin. Chaque molécule organique est un assemblage d'atomes de carbone, d'hydrogène, d'azote, d'oxygène liés entre eux par des liaisons énergétiques plus ou moins fortes. En brisant ces liaisons entre atomes, les bactéries récupèrent l'énergie qu'elles contenaient et l'utilise pour vivre et se multiplier. Les molécules les moins complexes sont les sucres (glucose). Elles sont consommées en premier, et rapidement, par les microorganismes. Avec la complexité grandissante de l'assemblage des molécules, c'est-à-dire avec des cohésions de plus en plus fortes entre les atomes qui les composent, leur dégradation, leur «consommation», par les bactéries, requiert plus de temps. Après les sucres, elles s'attaquent aux autres glucides (saccharose, amidon, cellulose, polysaccharides). Vient ensuite le tour des lipides, concentrés pour l'essentiel dans les cires et cuticules des feuilles et des aiguilles et, pour une faible part, dans les tissus de réserve, d'être dégradés par l'activité des microorganismes. Enfin les lignines, aux longues molécules donnant la rigidité aux végétaux, sont peu utilisées par les microorganismes comme source de carbone; elles perdurent plus longtemps dans les sols.

L'essentiel de la dégradation des cadavres organiques de végétaux (ou d'animaux) de la litière sont des bactéries appelées saprophytes. On peut comparer ces microorganismes à des petits mécaniciens démontant sans cesse les résidus de matière organique morte, comme on défait un «mécano», à part qu'ici, chaque pièce démontée correspond à un carbone, à un atome d'azote, à de l'oxygène, de l'hydrogène, et à des tas d'autres petites pièces annexes, soufre, phosphore, silice, fer, manganèse, calcium, potassium, sodium, etc., pour les livrer à d'autres ouvriers plus spécialisés chacun dans son domaine. Le but final étant de se nourrir et de se multiplier en récupérant l'énergie libérée et une partie des atomes détachés. Le reste des atomes remis en circulation, se reconstruit en nouvelles petites molécules assimilables par les racines de plantes.

Carbone (C) et azote (N), une fois libérés de la matière organique, s'engagent dans différents périples.

Tout d'abord le carbone. Une partie est utilisée par les bactéries, 2 à 8%, qui s'en nourrissent. La plus grande partie, 60 à 80%, est recombinaison à l'oxygène, en petites molécules, si petites, si légères qu'elles s'envolent ! Elles sont volatiles, et constituent un gaz, le gaz carbonique ou  $\text{CO}_2$ . Nous savons tous aujourd'hui, que ce gaz, qui diffuse depuis tous les pores du sol, est un gaz à effet de serre. Aussitôt émis, il se mêle à l'atmosphère dont il enrichit la concentration. Une petite partie de ce gaz reste dans la porosité du sol sous forme de gaz ou dissous dans l'eau qui y circule,

si bien que la teneur en  $\text{CO}_2$  contenue dans le sol reste 100 à 300 fois supérieure à celle contenue dans l'air que nous respirons. Mais imaginons un instant que cette fabuleuse histoire se déroule dans un sol qui a les pores bouchés, envahis par l'eau. L'oxygène ne peut que difficilement accéder aux atomes de carbone défaits. Ce n'est donc pas une oxydation qui se produit, mais une réduction, et le gaz émis n'est plus du  $\text{CO}_2$ , mais bien du méthane  $\text{CH}_4$ , accompagné de quelques uns de ses cousins germains, l'éthylène  $\text{C}_2\text{H}_4$  et l'éthane  $\text{C}_2\text{H}_6$ . Un tel cas existe dans les sols de rizières inondées ou dans les sols de marais. Et d'ailleurs, les rizières cultivées par les hommes contribuent à 20% des émissions anthropogéniques de méthane, dont l'effet de serre est trente fois supérieur à celui du gaz carbonique.



Et l'azote, que devient-il? Une fois démonté dans la litière par les bactéries saprophytes, l'azote est livré sous forme d'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) à des ouvrières aux noms compliqués (Nitrobacter, Nitrosomonas, Nitrosospira, Nitrosococcus, Nitrosolobus...) spécialisées dans le traitement de ces atomes. Là aussi, ces bactéries nitrifiantes ont pour rôle d'oxyder l'azote libéré. Cette oxydation est appelée la nitrification et conduit à fabriquer des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), forme très soluble de l'azote et assimilable par les plantes. Comme précédemment, si le sol cultivé est inondé et sa porosité pleine d'eau, des réactions de réduction apparaissent, ainsi que d'autres bactéries anaérobies (développées dans un milieu dépourvu d'oxygène). Celles-ci respirent l'oxygène contenu dans les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) qu'elles transforment en gaz, l'oxyde nitreux  $\text{N}_2\text{O}$  ou même en azote  $\text{N}$  qui diffusent vers l'atmosphère. Cette

réaction est appelée la dénitrification. Elle montre combien l'utilisation d'engrais azoté dans les rizières inondées, lorsque la plante croît, doit être pensée et soupesée, la production d'oxyde nitreux risquant d'être importante. Et ce gaz a un effet de serre de 200 à 300 fois supérieur à celui du gaz carbonique.

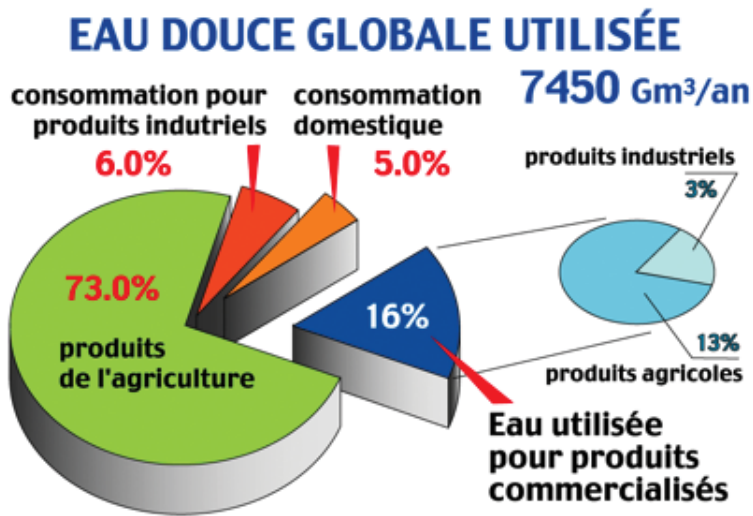
Les cycles du carbone et de l'azote sont donc étroitement couplés. La décomposition des résidus végétaux, et notamment de culture, va dépendre des quantités relatives de carbone et d'azote, mais aussi, de l'humidité du sol et donc de sa teneur en argile. Carbone et azote sont au cœur de la fertilité des terres mais aussi de la pollution de l'air (avec le  $\text{CO}_2$  et  $\text{N}_2\text{O}$ ) et de l'eau (avec le nitrate  $\text{NO}_3^-$ ).

Un sol est fertile s'il contient suffisamment de nutriments pour alimenter les végétaux qui y poussent, et si ce véritable garde-manger est régulièrement et naturellement renouvelé. Pour cela deux conditions sont requises qui sont à la source de tous les autres paramètres qui font qu'un sol est dit productif. Ce sont respectivement les argiles et la matière organique.

Les argiles sont ces minuscules minéraux de quelques milliardièmes de mètres disposés en feuillets (silicates en feuillets) empilés plus ou moins régulièrement et qui retiennent sur et entre leurs feuillets des atomes ou des petites molécules d'éléments dont les plantes ont besoin pour vivre et se développer : calcium, magnésium, potassium, fer, aluminium, oligoéléments, phosphore... tous étant entourés de molécules d'eau et solidement arrimés à l'argile. Avec tous ces nutriments accrochés de toutes parts l'argile ressemble à des «cars rapides» qui sillonnent les routes et les pistes de terre rouge d'Afrique, débordant de passagers et de colis.

Les argiles sont issues de l'altération des roches sous-jacentes par réaction chimique de ses minéraux avec l'eau de pluie, tout comme le fait un morceau de sucre qui se dissout dans l'eau. La différence est que les minéraux ne se dissolvent comparativement que très lentement, de quelques millimètres à quelques centimètres par millénaire. Une fois mis en solution les éléments chimiques peuvent être soit entraînés par l'eau qui percole dans le sol soit se recombinaient sur place en nouveaux minéraux de très petites taille, les argiles. Il est clair que la formation d'un sol argileux de quelques mètres d'épaisseur nécessite quelques dizaines à quelques centaines de milliers d'années. L'argile est donc très précieuse à la fertilité d'une terre. À l'échelle humaine, une fois en place, l'argile est irremplaçable. Elle constitue un capital à épargner coûte que coûte. Sa richesse en nutriments dépend tout d'abord de la composition des roches qui l'ont enfantée, et aussi du climat; car une pluie trop abondante aura tendance à entraîner avec son écoulement bien des éléments chimiques vers les rivières, çà de moins à récupérer entre les feuillets de l'argile.

### 3- L'eau d'irrigation et son coût



AGRICULTURE= 6400 Gm<sup>3</sup>/an

L'eau verte, c'est ainsi que l'on nomme l'eau qui tombe sous forme de pluie avec une moyenne planétaire de 900 mm/an. Mais l'eau de pluie arrose différemment la surface des continents. Certaines parties du globe, comme les régions froides nordiques ou les régions chaudes équatoriales, sont particulièrement bien loties en précipitations. Elles viennent alimenter les nappes phréatiques souterraines et grossir rivières et fleuves qui abondent. La quantité d'eau charriée par tous les fleuves de monde est estimée à 36 750 km<sup>3</sup>/an ce qui correspond à environ 7% des pluies tombées à la surface de Globe pendant une année (525 000 km<sup>3</sup>) ou autrement dit presque 32% des précipitations reçues par les terres émergées. L'essentiel est le fait des grands fleuves des régions humides. Quant aux nappes d'eau souterraines continentales, elles constituent un réservoir estimé à 8.1 millions de km<sup>3</sup>. L'eau de ce réservoir est importante pour la vie des hommes mais ne représente que 0,6% de la masse d'eau planétaire. Elle est disponible et le plus souvent accessible tout comme peut l'être l'eau des fleuves et des rivières et constitue toutes ensembles ce que les spécialistes désignent par «eau bleue».

Bien que le principal réservoir d'eau douce de la planète corresponde à l'eau stockée sous forme de neiges «éternelles» ou de glace (glaciers, calottes polaires, eau gelée des pergélisols), c'est-à-dire 33 millions de km<sup>3</sup> (environ 2.5% de l'eau totale de la Terre), elle reste peu accessible à une exploitation quotidienne nécessitée par le travail des hommes.



L'eau douce naturellement disponible pour les hommes est donc celle qui provient des précipitations sur les continents (en gros l'équivalent de 0,0085% de toute l'eau présente sur Terre), celle des cours d'eau (0,0027%) et celle des nappes souterraines (0,6%). L'eau des pluies et des fleuves est régulièrement et annuellement renouvelée et s'infiltré en partie pour charger les aquifères profonds.

De nombreux pays souffrent d'un déficit pluvial, car situés dans les zones climatiques arides ou semi-arides. Et pourtant ils n'en sont pas moins peuplés et nécessitent, pour le développement agricole de certaines de leurs régions, d'un aménagement important à des fins d'irrigation.

L'eau servant à irriguer est puisée directement dans les fleuves ou dans les réserves souterraines que constituent les nappes phréatiques.

L'eau est donc là, partout. D'ordinaire, les cultivateurs sont des gens de bon sens et mesurent les dépenses dans leur exploitation. Mais aujourd'hui, l'eau ne leur coûte presque rien. Bien plus, ils sont encouragés à aller chercher l'eau là où elle se trouve, au plus profond des couches géologiques qui galbent leur paysage, à 1000, 2000 ou 3000 mètres ! Dans certains pays, les lois leurs permettent de déduire de leurs impôts le prix des équipements nécessaires pour tirer l'eau des fleuves ou des nappes. De quoi activer leur hardiesse d'irriguer.

En creusant des puits ou en réalisant des sondages, c'est pire: la difficulté à concevoir qu'une réserve se vide lorsqu'on ne la voit pas nous est consubstantiel et nous interdit de croire que cela peut nous arriver. Les exemples ne manquent pas.

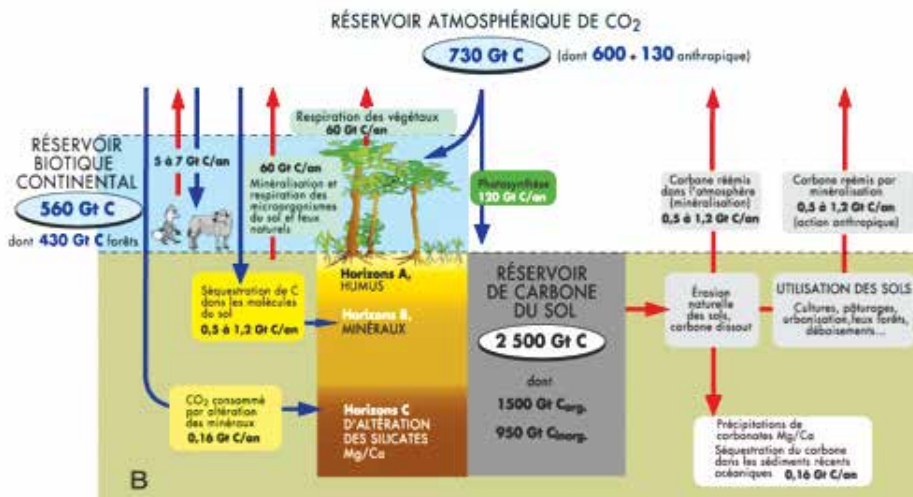
Les fleuves d'abord. Le Niger est le troisième fleuve d'Afrique, il arrose une grande partie de l'Afrique occidentale et favorise la culture du riz, du coton, de la canne à sucre. Il s'épuise désormais dans sa traversée des plaines du Mali. En Chine, le Fleuve Jaune d'où a fleuri un des premiers foyers agricoles, est contraint à supporter l'extraordinaire développement rural du pays. Vidé d'une partie de son flux, il n'atteint la mer désormais que pendant les fortes crues. Il en est de même de l'Indus.

Les eaux du fleuve servent à irriguer les sols arables. Une partie de l'eau qui a pu percoler jusqu'à la nappe souterraine et regagner le fleuve n'est plus la même. Sa composition chimique s'est modifiée en se chargeant en sels arrachés à l'argile du sol en profondeur. C'est un effet de boucle : plus on irrigue à partir des fleuves et plus l'eau qui retourne au fleuve est salée. Pour un grand fleuve comme le Colorado aux États-Unis, tout au long de son cours, il voit ses eaux se saler (20 fois). À tel point que l'eau du fleuve devenait inutilisable pour servir l'agriculture du Mexique à l'aval. Il aura fallu construire à la fin du XXe siècle une usine de dessalement à Yuma, pour que l'eau puisse être utilisée à des fins agricoles au Mexique. La conscience du risque

pour le devenir des eaux du fleuve Colorado n'était que conjoncturelle. Désormais l'eau tirée par le Mexique finit par épuiser le fleuve, qui se meurt sans atteindre son embouchure, sauf pendant les grandes crues. Et c'est tout l'écosystème marin du golfe de Californie qui se désorganise au grand malheur des artisans pêcheurs !

On ne saurait en effet modifier le débit des fleuves sans en subir à moyen terme les conséquences. L'évidence éclate lorsque ces fleuves aboutissent à des lacs ou mers intérieures. L'exemple de l'assèchement de la mer d'Aral. Autrefois plus étendue que la Suisse, la mer d'Aral figurait parmi les trois ou quatre plus grand lacs du monde : une mer intérieure qui a perdu aujourd'hui les deux cinquièmes de sa superficie parce que le débit des deux fleuves principaux qui l'alimentent est devenu insuffisant. L'eau puisée a servi pendant 30 ans à irriguer les champs de coton et de riz de l'Ouzbékistan et du Kazakhstan. Ce cas n'est pas unique. Le lac Chapala au Mexique a perdu la moitié de son volume et se réduit comme une peau de chagrin. L'irrigation, si utile aux hommes, devient pour les lacs, mers intérieures et fleuves des zones semi-arides, une plaie profonde d'où s'écoule l'eau nourricière. Certains fleuves jadis majestueux ne seront plus dans les décennies qui viennent que des ruisseaux égrots.

L'eau servant à irriguer est puisée directement dans les fleuves ou dans les réserves souterraines que constituent les nappes phréatiques.



Le rôle de l'agriculture dans la production de gaz à effet de serre a été minimisé

Le volume global d'eau douce utilisé pour la production agricole est estimé, en moyenne annuelle, au début du XXIe siècle, à 6400 milliards de m<sup>3</sup> (6400Gm<sup>3</sup>). Si

chaque nation devait fournir elle-même les produits agricoles de sa consommation intérieure, cette quantité d'eau douce globale serait portée à 6750 Gm<sup>3</sup> par an. L'échange international de denrées alimentaires permet, à l'évidence, d'économiser un peu plus de 5% de la consommation d'eau douce à des fins agricoles. L'intérêt des nations est donc de favoriser le commerce de marchandises agricoles qui nécessitent beaucoup d'eau pour être produites, depuis un pays dont la ressource en eau douce abonde vers un pays à ressource en eau limitée. C'est, à n'en pas douter un bienfait de la globalisation.

Mais la ressource en eau douce n'est pas la seule à considérer. L'abondance des terres arables et leur fécondité sont tout aussi importantes. Le Canada ne compte pas la richesse de sa ressource en eau, en revanche il est limité par ses terres à usages agricoles. Ce pays est contraint à préserver la fertilité de ses sols et pour cela doit mettre en œuvre des pratiques de conservation de sa terre.

Une culture, pour croître, a besoin d'eau et de nutriments. L'eau est celle que la plante a dû mobiliser par ses racines depuis sa germination jusqu'à sa maturité, c'est-à-dire jusqu'à sa récolte. C'est en quelque sorte toute l'eau évaporée (on parle d'eau «évapo-transpirée») par chaque individu végétal tout au long de son existence. La plante a aussi sa propre eau de constitution comme toute espèce vivante. Mais cette quantité d'eau est infime lorsqu'on la compare à l'eau consommée tout au long de sa vie. Par exemple, l'eau contenue dans un kilogramme de blé est de un litre, en revanche pour produire ce même blé, il aura fallu utiliser entre 1000 et 1500 litres d'eau selon la qualité du sol sous-jacent. Les nutriments sont fournis à la plante par l'argile du sol et par la matière organique dégradée devenue assimilable. Pompée par les racines et transportée sous forme de sève montante, l'eau gorgée de nutriments est ensuite distribuée dans tous les tissus et toutes les cellules du végétal. Si le sol est déficient en nutriments, comme c'est désormais souvent le cas après une trop longue période d'exploitation du sol, on y rajoute des fertilisants, industriels le plus souvent.

L'eau virtuelle contenue dans les produits agricoles commercialisés entre nations est un moyen d'économiser sensiblement l'usage de l'eau douce mais aussi de préserver une partie des terres arables les plus fragiles à l'échelle de la planète. Et l'économie est d'autant plus substantielle que les denrées sont issues d'un pays à ressource en eau importante et riche en sols fertiles, et destinées à un pays dont ces deux ressources naturelles font défaut.

Plus qu'une simple question d'économie, il s'agit bien d'un fondement stratégique, dans la mesure où des conflits sociaux internes et des guerres entre états riverains peuvent être évités. Bien des pays, où les ressources en eau et en terre arable sont à la merci d'une fluctuation climatique décennale, sont concernés.

Le coût des produits issus de l'agriculture reflète le prix de l'eau, des traitements sanitaires, des fertilisants, des techniques de labourage et de fermage, du fioul consommé etc. Cependant comment estimer l'utilisation et la dégradation des sols qui sont le soubassement de toute production agricole? Comment mesurer la vie qu'il contient et sa fertilité naturelle? Car ne nous y trompons pas à chaque usage, à chaque labour, le sol se dégrade et perd en fécondité, tout comme la déforestation, qui a permis de substituer aux arbres un sol agricole, a eu un prix dont nous nous sommes peu souciés, mais qui apparaît plus tard sous forme de modification de l'équilibre atmosphérique : changement du régime des pluies, du contenu de gaz à effet de serre...

Le prix de l'eau est-il lui même convenablement estimé ? Sur les 6400 Gm<sup>3</sup> d'eau douce utilisée chaque année par l'agriculture, 5330 Gm<sup>3</sup>/an est de l'eau verte (eau de pluie) et 1070 Gm<sup>3</sup>/an proviennent du prélèvement effectué par ou pour les agriculteurs dans les nappes phréatiques et les rivières. Heureusement l'essentiel de l'eau nécessaire à l'agriculture est celle des précipitations naturelles. Est-ce pour autant qu'il ne faille donner aucune valeur à cette eau ? Ce sont presque 5% de l'eau de pluie qui tombe sur les continents (115000 Gm<sup>3</sup>/an) et un peu moins de 3% du débit de tous les fleuves du monde qui servent à nous alimenter chaque année. Cela peu paraître dérisoire dans la mesure où la richesse est renouvelable. Et pourtant pour nourrir la population mondiale, nous avons vu qu'il faudra doubler les prélèvements d'eau bleue dans la prochaine décennie et les multiplier par cinq d'ici 2050. Prélever l'équivalent de 15% du débit mondial des fleuves en 2050 aura des conséquences sérieuses dont il faut se soucier dès à présent. Les exemples traités ci-dessus devraient nous y aider.

Le commerce global d'eau virtuelle permet de sauvegarder l'équivalent d'un tiers de l'eau dont nous nous servons pour irriguer chaque année, c'est aussi comparable au débit annuel de trois grands fleuves comme le Nil ou l'Orénoque.

Le concept d'eau virtuelle est souvent pris en dérision par les agronomes qui n'ont pas eu à travailler avec les petits paysans des régions arides. Et pourtant, il a aussi un autre avantage. Celui de faire prendre conscience au citoyen, mais aussi à l'agriculteur, de la quantité d'eau douce qu'il aura fallu utiliser pour produire notre alimentation.

L'apport de protéines est essentiel à notre régime alimentaire journalier. On les trouve dans les végétaux et les animaux que nous consommons. Produire 1kg de protéines animales nécessite d'utiliser de 3 à 10 kg de protéines végétales et fabriquer 1kg de celles-ci requiert de consommer 1000 à 10 000 litres d'eau douce. À titre d'exemple «pour fabriquer 1kg de protéines de poulet, il faut 2,5 kg de protéines végétales ; le

rapport est de 1 à 6 pour le porc et de 1 à 8 pour le bœuf». Les produits carnés ont donc une plus haute valeur en eau virtuelle que les produits de culture à la base de notre alimentation ou de celle des animaux d'élevage. Plusieurs études ont calculé le prix de revient en eau virtuelle d'un kilogramme de viande de bœuf désossé en additionnant, sur les trois années d'élevage, le fourrage et les grains employés à son alimentation, l'eau utilisée pour les services et pour étancher sa soif. Bien sûr les résultats obtenus dépendent du terroir, du climat et des techniques de fermage, mais en moyenne, les chiffres acquis restent impressionnants : fabriquer 1kg de viande de bœuf nécessite d'utiliser 16 000 litres d'eau douce, 5 000 litres pour le porc, 4 000 pour le poulet.

Parmi les produits de culture les plus consommés au monde figurent le riz pour 21%, le blé pour 12% et le maïs pour 9% et fabriquer 1kg de ces céréales revient à dépenser respectivement 3 000 litres, 1 500 l et 900 l.

Aujourd'hui, nous sommes en mesure de convertir en équivalent eau toute nourriture, tout produit confectionné, comme on le fait par ailleurs pour le gaz carbonique CO<sub>2</sub>. N'y voyez aucun engouement à la mode, mais bien une donnée nécessaire à une prise de conscience des humains sur le prix de l'eau ou de l'air. Ainsi, ce petit déjeuner pris au Brésil, dans la quiétude d'un lever de soleil tropical, aura coûté pas moins de 2000 litres: trois tasses de café, 420 litres ; un petit pot de lait, 200 litres ; deux verres de jus d'orange, 340 litres; deux tomates, 26 litres ; une pomme de terre, 25 litres ; six tranches de pain, 240 litres; le beurre (25 g) et le fromage (50g), 375 litres ; un peu de confiture et un fruit, 100 litres, une omelette de deux œufs, 270 litres !

Les données récemment publiées nous enseignent que le café est la culture qui consomme le plus d'eau, heureusement sous forme d'eau de pluie. En revanche la canne à sucre apparaît comme la culture la moins exigeante avec 142 litres par kilogramme produit. Tout l'intérêt de cette dernière culture pourra être saisi lors de la confection de biocarburants en la comparant aux autres produits employés : oléagineux ou aux autres céréales, maïs, blé, orge. Nous y reviendrons.

Construire des barrages et des retenues, forer des puits jusqu'aux nappes souterraines parfois très profondes, recueillir l'eau des fleuves, aménager des canaux ou des canalisations pour acheminer l'eau d'irrigation jusqu'au champ, tout cela nécessite des investissements financiers considérables. Comparés au prix de l'eau payée par l'agriculteur à l'arrivée, il faut bien reconnaître, quel que soit le pays, que le compte n'y est pas, même si les barrages sont aussi là pour fournir de l'énergie électrique et pour réguler le débit de cours d'eau qui peut s'avérer dévastateur en cas de crues.

Tout en considérant ces bénéfices secondaires, les économistes sont unanimes pour reconnaître que les gains financiers de l'irrigation sont marginaux ou négatifs. Ce qui signifie tout simplement qu'une part importante de nos impôts sert à subventionner l'irrigation. Ne peser l'activité de la ferme qu'à travers ses coûts et ses revenus, ne suffit pas à justifier le prix du litre d'eau d'irrigation.

#### 4- Le climat

Entre 1850 et 2000, la contribution cumulée de l'agriculture en CO<sub>2</sub> atmosphérique est estimée à 264 milliards de tonnes (Gt) de carbone, alors que les émissions dues à l'utilisation des combustibles fossiles et à la fabrication de ciment seraient de 200Gt. D'autres auteurs inversent l'importance relative des contributions : de 81 à 191Gt de carbone pour l'agriculture et de 240 à 300Gt pour les autres.

Peu importe les différences d'estimations, c'est la tendance qu'on doit considérer, surtout qu'il faudrait remonter au moins jusqu'à 1720 pour calculer pleinement la contribution cumulée de l'agriculture aux émissions de gaz à effet de serre. Ces différences d'estimations laissent également entrevoir les difficultés des hommes de sciences à cerner la réalité si complexe du devenir de la matière organique du sol. Les mécanismes biologiques et chimiques impliqués dans la séquestration du carbone ont de nombreuses implications secondaires qu'on cerne mal. La compréhension du stockage du carbone organique du sol repose très largement sur des expériences de laboratoire. Ce qui fait que les relations entre les processus de dégradation et la composition des communautés microbiennes du sol, n'est pas bien prise en compte dans les modèles dynamiques traitant de la matière organique du sol

Les émissions de gaz carbonique dues à l'usage du sol doivent rassembler celles provenant de la déforestation, qu'elle résulte de l'extension des champs, de l'exploitation du bois d'œuvre, ou des incendies de forêt ; mais aussi, celles dues à l'augmentation du bétail, à la conversion des terres, à la mise en labour, aux différentes cultures...et bien sûr, celles redevables à la diversité biologique qui œuvre dans l'obscurité, notamment les microorganismes. C'est la raison pour laquelle les modélisations numériques ou thermodynamiques, qui traitent du bilan carbone, aboutissent encore à des résultats bien insuffisants. Dans toutes les tentatives de modèles, la part attribuée au sol reste une inconnue de taille.

En comparaison, malgré la perte de matière organique due à l'exploitation du sol pendant trois siècles, la terre contient un stock de carbone impressionnant qui est 3,3 fois celui de l'atmosphère. Il constitue un réservoir de carbone estimé à 2500 Gt incluant 1500 Gt de carbone organique (inclus dans la matière vivante et morte) et 950 Gt de carbone inorganique (essentiellement sous forme de gaz, de minéraux).

Globalement, plus de 20% des terres arables sont aujourd'hui dégradées par érosion, et chaque année 0,5% de la couverture cultivable disparaît, perdue à tout jamais. Le carbone du sol qui est déplacé par érosion est estimé par an, entre 1 à 2 milliards de tonnes (Gigatonnes, G/t), soit de un à deux fois l'équivalent carbone de la production industrielle des États-Unis. L'homme est devenu le principal agent d'érosion en ayant multiplié par 2,4 les quantités de terre déplacée par l'érosion naturelle. Celle-ci, estimée à 11 milliards de tonnes de matière annuellement et naturellement transportée à l'océan, est passée désormais à 26 milliards de tonnes.

## 5- Quelles solutions pour une économie plus durable ?

### Les Biocarburants

Aujourd'hui les sociétés industrialisées prennent conscience de la pénurie à venir des combustibles fossiles ou tout au moins de la nécessité d'exploiter des gisements de plus en plus profonds et des ressources à teneur en huiles carbonées réduites. Le coût des carburants fossiles devenant important, les pays tournent leur regard vers les plantes cultivées annuelles susceptibles d'être transformées en combustibles. On les appelle les biocarburants ou agro-carburants.

Pourquoi utilise-t-on des cultures à de telles fins? Est-ce justifié, alors que les denrées alimentaires semblent si précieuses pour assurer la sécurité alimentaire d'une population mondiale grandissante? Pour comprendre les nécessités énergétiques des pays et leur engouement pour les biocarburants, essayons de cerner comment se sont formées les combustibles fossiles et comment les plantes vivantes peuvent s'y substituer.

Le raisonnement est simple...au départ. Ce que la nature a pu faire des végétaux en les transformant en combustibles fossiles, au cours de plusieurs dizaines de millions d'années, ne peut-il être fait à l'échelle de quelques jours ou semaines par les technologies humaines? La réponse est bien sûr oui, et les produits obtenus sont des biocarburants.

À partir de là, les pays qui sont, pour leur approvisionnement en pétrole, sous forte dépendance d'autres pays, peuvent palier, en partie, à leur besoin énergétique, en produisant leur biocarburants et en adaptant technologiquement les moteurs qui les utiliseront. Un double avantage pour leur économie. Le Brésil est, encore une fois, un bon exemple. Depuis la crise de 1929, ce pays travaillait sur le procédé de fabrication de carburant biologique pour équilibrer une balance commerciale compromise par les importations. Puis, avec les crises pétrolières des années 1970, la production de biocarburants s'est généralisée, grâce à la création, dans tout le pays, d'une infrastructure remarquablement efficace, avec des plantations dévolues,

des usines de fabrication, des réseaux de distribution. Aujourd'hui, avec plus de 180 millions d'hectolitres, le Brésil est de loin le premier producteur mondial. Son industrie automobile a connu un développement insigne, produisant à ce jour des véhicules pouvant indifféremment fonctionner à l'essence ou au biocarburant.

Deux biocarburants sont actuellement produits industriellement : les esters (composés organiques) issus d'huiles végétales et l'éthanol (alcool) issu des glucides (sucres) végétaux tels que le saccharose, l'amidon, la cellulose, tous trois produits par la photosynthèse.

Les esters d'huiles végétales sont obtenus à partir de graines d'oléagineux, colza, tournesol (dont on fait nos huiles domestiques), soja, palmier à huile. Ces extraits huileux ne peuvent pas être utilisés directement, ils sont transformés avec du méthanol (alcool obtenu à partir du bois d'arbre à croissance rapide comme l'eucalyptus, ou à partir de paille, de coque d'arachide etc.). Le produit obtenu est un biodiésel appelé par les spécialistes EMHV (ester méthylique d'huile végétale).

L'éthanol est directement issu de la distillation de végétaux riches en sucres comme la canne à sucre, la betterave sucrière, le maïs, l'orge, le blé... Des pays, comme le Brésil ou les États-Unis, l'utilisent directement ou mélangé à l'essence. En Europe, il n'a pas été employé pur, mais sous forme ETBE (éthyl tertio butyl éther) afin d'éviter, en présence d'eau, une séparation entre alcool et essence lors des mélanges. Depuis 1998, l'Europe autorise les mélanges pour une vente à la pompe sans aucune indication pour le public.

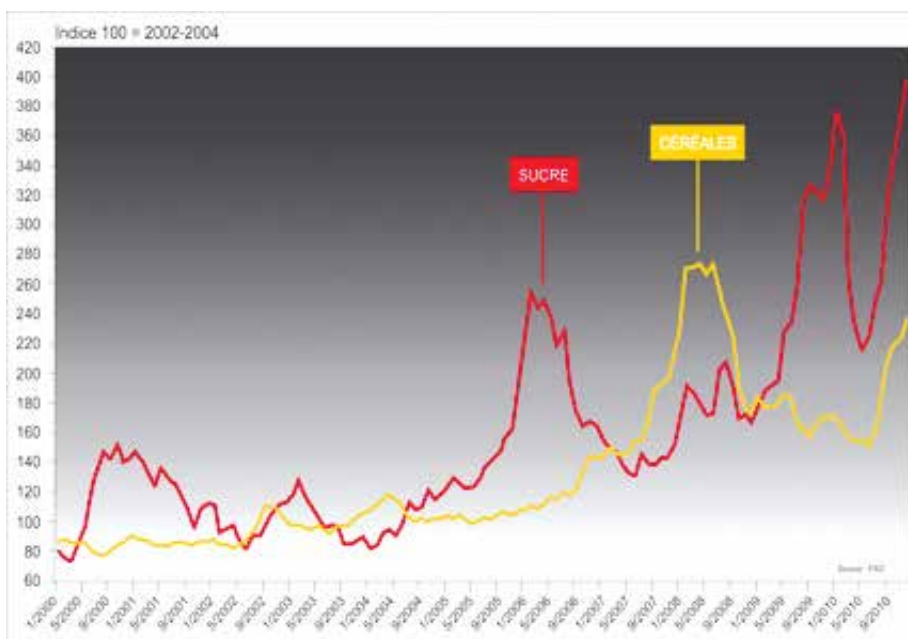
Aujourd'hui, seuls les graines des plantes sont utilisées pour la fabrication de biocarburants dits de première génération. Et chaque plante n'a pas le même rendement énergétique à l'hectare. Le colza produit en moyenne 1200 litres d'équivalent pétrole à l'hectare (1200 l/ha) ou en gros 1,2 tep/ha, le blé 1700 l/ha ; la betterave entre 2000 et 3000 l/ha ; le maïs entre 3000 et 4000 l/ha ; la canne à sucre 6800 l/ha ... Chiffres éloquentes, montrant qu'il faudrait utiliser la canne à sucre qui, en plus, peut se contenter de sols dégradés, et consomme le moins d'eau douce ( 140 litres pour un kilogramme produit). Hélas, elle ne pousse pas sous tous les climats.

Les recherches sont activement menées dans de nombreux pays, pour augmenter le rendement en équivalent pétrole à l'hectare. Peu de solutions existent: ou bien, on trouve la plante rare dont le rendement serait miraculeux, et là peu d'espoir, ou bien on utilise la totalité du végétal et non plus qu'une partie des fruits ou des graines. Cette deuxième voie est celle qu'ont abordée la plupart des pays qui se destinent à la production de carburants d'origine végétale. Ces biocarburants sont dits de deuxième génération et ils permettraient de multiplier par un facteur 5 la productivité à l'hectare.



En 2006, un rapport de la commission européenne et de deux associations engagées auprès des industriels du pétrole et de l'automobile a été cité par l'INRA pour évaluer l'intérêt des biocarburants. «L'éthanol, produit à partir des grains de blé, permet une réduction d'environ 30% de la consommation d'énergie fossile et 22% d'émission de gaz à effet de serre par rapport à une filière essence conventionnelle. La substitution du gazole par du biodiésel de colza, conduit à une réduction d'environ 64% de la consommation d'énergie fossile et de 53% des émissions des gaz à effet de serre. La substitution par des biocarburants de la deuxième génération, issus de résidus forestiers et agricoles et de déchets de papèterie, porterait ces réductions aux alentours de 90%. Cette estimation se rapproche du bilan de l'éthanol de canne à sucre qui permet aujourd'hui les plus fortes économies d'énergie fossile (presque 100%) et de gaz à effet de serre émis (environ 85%), car les besoins énergétiques de la conversion du sucre en alcool sont (aussi) assurés par les résidus de canne ».

*Les biocarburants sont-ils, comme ce rapport le présente, la solution énergétique d'avenir en tant que carburants liquides ? Une sorte de filon d'or vert ! Rien n'est moins sûr. Voyons pourquoi ?*



Implication de la diminution des Gaz à effet de serre et de l'utilisation des biocarburants

L'engouement pour les biocarburants pousse de nombreux pays tropicaux à exploiter leur forêt. Ils y voient un nouvel Eldorado économique grâce aux débouchés offerts par les pays occidentaux. La demande de bois d'œuvre, de pâte à papier, avait permis

d'entamer sérieusement les grandes forêts humides, et voilà que l'huile de palme s'en mêle ! Prisée par l'industrie, cette huile végétale entre dans la composition de milliers de produits alimentaires, de savons, de cosmétiques et aujourd'hui les plantations de palmiers à huile permettent d'obtenir un carburant de meilleur rendement à l'hectare que le coprah, le colza ou le soja : deux à cinq fois plus ! Et depuis une quinzaine d'années, les forêts tropicales humides s'effacent à toute allure de la carte de certains pays, pour faire face à d'immenses plantations, souvent illégales, de palmiers à huile. L'Indonésie, la Malaisie et désormais la Papouasie-Nouvelle-Guinée apparaissent comme les principaux pays producteurs d'huile de palme. Pour cela, ils auront sacrifié près de 100 millions d'hectares de forêt primaire.

L'exemple de ces trois pays laisse supposer que l'impact écologique de l'utilisation des biocarburants si souvent présenté comme bien meilleur que celui dû à l'usage des carburants fossiles, notamment au niveau du bilan carbone, n'est peut-être qu'une fausse idée. Consommer pour les transports des biocarburants plutôt que des combustibles fossiles, permet sans aucun doute une économie de gaz à effet de serre rejeté dans l'air de 20 à 30%. Mais si on prend le temps de raisonner comme un scientifique et non plus comme un ingénieur, c'est-à-dire si l'on dresse un bilan écologique de chacune des étapes de fabrication des biocarburants et de ce qu'elles impliquent comme perte en carbone, en biodiversité, en eau d'irrigation, ou comme utilisation d'engrais ou de pesticides, on s'aperçoit que le résultat final ne plaide guère en faveur des biocarburants.

Des études récentes montrent au Brésil, en Asie du Sud est, aux États-Unis, que la conversion des terres de forêts tropicales, de savanes, de prairies ou tout simplement de cultures alimentaires, en terres à plantes destinées à la fabrication de biocarburants, entraîne un rejet annuel de gaz carbonique dans l'air de 20 à 400 fois plus important que celui libéré par les carburants fossiles qu'ils devraient remplacer ! Il faudrait des décennies, voire des siècles pour que le bilan carbone retrouve un équilibre en faveur des biocarburants.. Prenons l'exemple des États-Unis qui projettent de produire, cinquante six milliards de litres d'éthanol à partir de cultures de maïs, ce qui équivaut en volume de biocarburants à 1/100<sup>e</sup> de la production pétrolière actuelle par an. Pour atteindre cet objectif il faut convertir environ 13 millions d'hectares de forêts, et de terres à soja et à blé jusqu'alors utilisées à des fins de productions alimentaires. Les conséquences de cette conversion sont multiples. Tout d'abord les prix des denrées alimentaires, à en croire les modèles de calculs de scénarios proposés, vont connaître sur le marché national américain et sur les échanges mondiaux de fortes perturbations. On devrait voir augmenter le prix du maïs de 40%, celui du soja de 20% et celui du blé de 17%. Dans le même temps, les exportations des États-Unis déclineront de 62% pour le maïs, de 31% pour le blé, de 28% pour le soja et par voie de conséquence une chute des exportations de la viande de porc de 18%

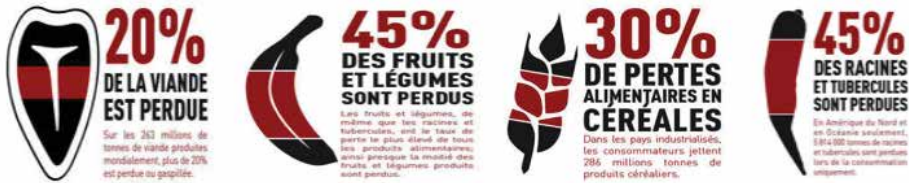
et de 12% pour celle de poulet. Ensuite cette conversion de terres produirait une augmentation de 25 à 50% de gaz carbonique au moins pour les trente années à venir. Soustraire environ 13 millions d'hectares de bonnes terres fertiles, «alimentaires», reviendrait à retirer 10% en poids de la production mondiale de grains à des fins de nourriture, 0,9% en poids de la consommation de viande et 0,6% de produits laitiers, et tout cela à une période où la croissance démographique exigerait une plus grande production de denrées alimentaires. Il faudrait donc que ces 13 millions d'hectares dévolus à la fabrication de biocarburants puissent être compensés par la mise en culture d'autant de terres, à condition qu'elles soient tout aussi fertiles que les terres nord-américaines. Dans le cas contraire, ce sont vraisemblablement de plus grandes surfaces de sols qu'il faudrait utiliser dans d'autres pays, avec toujours plus de labours, plus d'engrais, plus d'irrigation, plus de pesticides.

Et ces scénarios calculés ne prennent pas en compte bien sûr les changements importants que connaîtrait la biodiversité! Ni les incertitudes climatiques qui pourraient survenir brusquement, comme à l'été 2008 aux États-Unis, où les intempéries avaient conduit à inonder le grenier céréalier du pays, ou bien comme la sécheresse et les incendies qui ont décimé une partie de la production russe au cours de l'été 2010.

Si donc les biocarburants sont incontournables, il faut savoir quel en sera le prix à payer pour l'environnement. En revanche, il faudrait orienter leur fabrication à partir de plantes non utilisées pour nourrir les hommes et les animaux. En ce sens, avec les biocarburants, on est en plein paradoxe. Les terres servant la chaîne alimentaire sont trop précieuses pour être détournées, surtout dans les pays qui en ont le plus besoin. Les pays pauvres subissent, plus que d'autres, le poids des factures pétrolières. Ils souhaitent pour s'en soulager, comme le fit le Brésil en son temps, développer une filière énergétique alternative à partir de la biomasse. Plusieurs nations africaines et asiatiques sont dans ce cas.

Le souci majeur pour les scientifiques est de résoudre ce problème et plusieurs solutions sont à l'étude. Des plantes pérennes de pays chaud comme le jatropha curcas avec un potentiel de production d'huile de 1800 litres à l'hectare sont sous les projecteurs de la recherche ; et déjà la Chine et l'Inde encouragent sa culture en sachant que cette plante pourrait pousser dans toute une partie du continent africain et du Sud-Est asiatique. Au Japon, on se penche sur la valorisation des algues marines, sous le regard intéressé de plusieurs grandes compagnies aériennes. Mais n'oublions pas l'énorme potentiel de la canne à sucre capable de s'adapter à des sols dégradés et même à en stopper l'érosion. Pour l'instant, le Brésil reste le principal producteur d'éthanol, et a lancé, tout comme les États-Unis, plusieurs programmes de biotechnologie soit sur l'amélioration génétique de la canne, pour augmenter sa

teneur en sucre, pour la rendre résistante à la sécheresse et tolérante au virus de la maladie dite de la mosaïque; soit pour transformer la bagasse, ce résidu restant après en avoir extrait le jus, en éthanol par la modification d'enzymes impliqués dans la fermentation, cette réaction biochimique qui permet de transformer le sucre en alcool. Dans une poignée d'années, tous ces procédés seront lancés à une échelle industrielle.



Ampleur des pertes et gaspillages : un tiers des aliments produits pour la consommation humaine, soit 1,3 milliards de tonnes (FAO, 2011)

Enfin, de très nombreuses publications scientifiques rapportent des résultats très prometteurs sur la transformation de la biomasse (résidus végétaux de tous ordres) et des déchets organiques domestiques ou animaux par procédés de pyrolyse ou microbiologique. L'intérêt se porte même sur un champignon (*Trichoderma reesei*) qui dégrade de façon complète les débris végétaux en sucres simples, offrant de nouvelles perspectives pour la fabrication de biocarburants de deuxième génération.

### **Cultiver autrement, c'est s'assurer d'une économie agricole durable**

Le labour aère la terre en la retournant, ce qui était son but, puisque la terre, ainsi «ameublie», permettrait aux racines des plans cultivés de mieux la pénétrer, tout en supprimant les mauvaises herbes. Aérer veut dire oxygéner ! La matière organique qui était enfouie, prête à fertiliser les racines des végétaux, est subitement portée à l'air et s'oxyde en gaz carbonique qui s'échappe de la terre pour gagner l'atmosphère. Et avec lui, la fertilité part en fumée. Bien plus, l'eau liée à la fine porosité des argiles arrangée en agrégats, s'évapore et le sol, livré aux rayons du soleil, voit sa température de surface multipliée par deux ou trois, asséchant davantage la terre. Microorganismes, champignons filamenteux, vers de terre et bien d'autres créatures vivantes diminuent alors de façon marquante.

Après un tel constat ne pourrait-on pas cultiver sans labourer ou tout au moins en réduisant le travail du sol ? Depuis des premières expériences concluantes menées à Rothamsted dans les années 1930, de nouvelles méthodes de mise en culture,

mélangeant pratiques anciennes et modernes, furent proposées.. En gros, trois méthodes de techniques culturales simplifiées sont de nos jours utilisées dans de très nombreux pays où l'agriculture joue un rôle important. Il s'agit des cultures sous couvertures ou sous paillis («mulch tillage»), le non labour («no-tillage»), et le labour réduit («reduced till»). Bien que ces trois méthodes diffèrent, elles tendent toutes à préserver et développer un sol fertile, un milieu vivant, (et cela) requiert une attention quotidienne qui permet à terme d'assurer des niveaux de production équivalents voire supérieurs aux méthodes traditionnelles tout en autorisant des réductions d'intrants. Car il ne faut pas rêver, ces méthodes ne suppriment pas les pesticides, elles les limitent. Elles ne les emploient que spécifiquement avant le travail limité du sol ou avant le semis direct. Limiter le travail du sol ou encore mieux, le réduire à un simple sillon fendu par un disque ou un couteau, le temps d'y déposer le semis puis refermé aussitôt, reste une façon de préserver son intégrité naturelle. La technique du non labour ou du semis direct convainc de plus en plus de pays. Elle est la forme la plus accomplie de la simplification du travail du sol et de sa préservation. Aujourd'hui, près de 100 millions d'hectares à travers le monde y sont consacrés, quelque soit le type de sol et quel que soient les conditions climatiques. En Amérique du Nord (États-Unis et Canada), ce sont entre 20 et 25% des terres cultivées et environ 50% au Brésil, Paraguay et Argentine, mais déjà toute le reste de l'Amérique latine s'y est mis. L'Inde, la Chine, l'Afrique du Sud, l'Australie consacrent des millions d'hectares à ce procédé de culture... mais l'Europe reste drapée dans ses certitudes ancestrales : seulement 1,5% des terres sont dévolus au non labour ! Et lorsqu'on sait que la Grande-Bretagne à elle seule se sert de cette méthode pour un tiers de ses terres à céréales, on imagine la réticence majoritaire chez la plupart des autres européens. En France, seulement 0,7% des sols cultivés sont consacrés au semis direct.

Le semis planté sans retourner la terre, sous les résidus ou paille de la végétation précédente, conduit à une culture à bon rendement. Quel que soit le sol. Et en plus, l'évaporation de l'eau du sol est considérablement réduite, la température de surface chute d'un facteur deux, l'érosion est diminuée d'un facteur treize pour les champs dont la pente est de 5% et d'un facteur 23 pour un modelé avec une pente de 9%. Ce qui signifie tout simplement que l'érosion due au facteur humain disparaît tout simplement avec des valeurs de moins d'une tonne à l'hectare et par an. Le ruissellement minimisé, ce sont des tonnes de fertilisants à l'hectare qui ne sont plus entraînés avec l'argile vers les rivières et les fleuves diminuant leur pollution. Mais avec le non labour (ou le semis direct), la fertilité en matière organique se reconstitue dans les dix premiers centimètres et les populations de vers de terre se multiplient par deux ou trois, entraînant rapidement une meilleure infiltration des eaux de pluie, ce qui est particulièrement important pour les terres des pays frais et humides qui ont tendance à s'engorger sous les pluies fréquentes.

L'augmentation de la matière organique dans les premiers centimètres du sol s'accompagne d'une augmentation de potassium, de phosphore, d'azote, qui, protégés au sein des agrégats argileux, sont moins lessivés, moins entraînés en profondeur par les eaux de percolation. Et tant que le sol reste humide, leur disponibilité pour les plantes est totale. C'est une économie d'engrais potentielle. Mais les bactéries pullulant à nouveau, elles peuvent entraîner par leur action une dénitrification et libérer de l'oxyde nitreux vers l'atmosphère.

Tout est-il si merveilleux dans ces pratiques de semis direct? Non, mais c'est l'approche de travail qui préserve le mieux le sol et qui lui restitue ses fonctions naturelles. Si à cela s'ajoutent les économies d'énergie (fuels essentiellement) estimées entre 10 et 20% en moyenne (voire jusqu'à 50% dans des fermes expérimentales du Brésil), la moindre usure des outils et engins agricoles, et donc une économie du temps de travail, on peut dire sans hésiter que la pratique agricole du semis direct présente d'énormes avantages comparée au labourage moderne devenu, en un siècle seulement, une tradition avérée.

Les fertilisants chimiques tels que l'azote, le phosphate, la potasse, sont employés pour compenser le manque en nutriments d'un sol, soit parce que sa composition minérale et organique originelle est déficiente, soit parce que cette dernière s'épuise par excès d'exploitation agricole. Les produits servent à obtenir des plantes de qualité et des récoltes suffisantes.

Au début du XXI<sup>e</sup> siècle, le monde agricole avait recours à près de 140 millions de tonnes par an. Avec un souci évident de diminuer leur impact sur la dégradation de l'environnement, de nouvelles formes de fertilisants apparaissent sur le marché. Ceux-ci présentent des dissolutions plus lentes et mieux contrôlées dans les horizons supérieurs du sol, rendant l'utilisation des nouvelles formes d'azote mieux adaptées à la sauvegarde des nappes, et des rivières. Mais leur prix plus élevé et la réponse des plantes cultivées, inférieure par kilogramme d'azote, limitent leur généralisation.

Il paraît impossible de se passer de fertilisants minéraux qui restent un facteur limitant de la production agricole. Car chaque récolte soustrait du sol une quantité donnée de nutriments minéraux qu'il faut connaître pour éviter les carences. Par exemple, en pays tempéré une production d'environ 8 tonnes de grain de blé à l'hectare ponctionne 25 kilogrammes de phosphore et autant de potassium. Cependant un sol développé sur granite ne présentera pas les mêmes besoins qu'une terre sur calcaire. Le retour régulier de nutriments à la terre est une obligation. Les ajouts d'engrais y pourvoient, car dès la première récolte, la terre perd de son contenu nutritionnel. Ils restent indispensables mais peuvent être considérablement réduits dans leur usage

grâce à la connaissance que nous avons désormais de leur cycle chimique, de leur interaction avec l'argile du sol et les racines des végétaux, de leur actions sur la vie diversifiée de la terre. Leur diminution et leur usage plus précis s'ils s'accompagnent de techniques de conservation du sol que nous avons précédemment mentionnées, constitueraient à n'en pas douter une révolution dans la façon de traiter le sol arable pour nos besoins. Bien plus, certains engrais peuvent être remplacés s'ils devaient contenir trop de cadmium ou autres métaux toxiques, par de la farine de roches basaltiques, qui a prouvé son efficacité sur le rendement des cultures des sols brésiliens.

### **Réduire les pertes et les gaspillages**

Les produits alimentaires entre le champ et l'assiette connaissent une grande perte. Il s'agit d'un tiers des aliments produits pour la consommation humaine soit 1,3 milliard de tonnes, ce qui est considérable. En gros ce sont 30% de céréales, 20% de viande, 45% des fruits et légumes, 45% de racines et tubercules. Les pertes sont de tous ordres, mais dans les pays sous-développés, le stockage apparaît comme un facteur de pertes importantes (essentiellement par des bactéries et microchampignons) et il serait nécessaire d'envisager une politique massive de construction de silos métalliques.

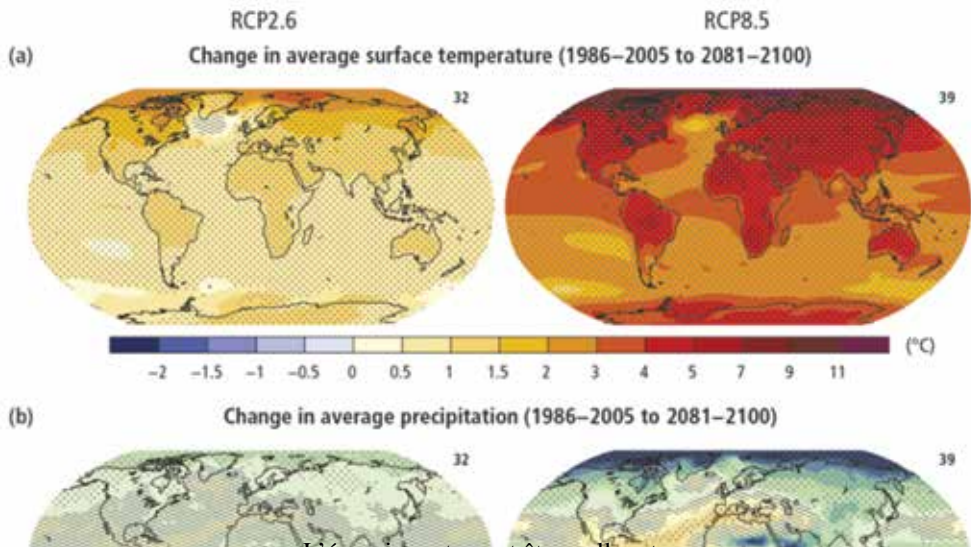
### **Changer de paradigme économique**

Les révolutions agricoles puis industrielles notamment au cours du XX<sup>ème</sup> siècle avec une exploitation sans retenue des ressources naturelles a donné naissance à une croissance économique linéaire basée sur la consommation dont les coûts climatique, écologique et humain sont considérables (indicateurs de bien-être en décroissance depuis 50 ans). Récemment les coûts énergétiques ont été en augmentation considérable après les accidents survenus à Fukushima pour le nucléaire et dans le Golfe du Mexique pour le pétrole, car désormais le coût du risque est venu s'ajouter à la simple exploitation du combustible. Et de plus le modèle économique actuel détruit plus qu'il ne crée d'emplois (impact prévu sur le PIB: chute de 0,7% à 2,5% en 2060).

Il paraît urgent de changer de paradigme économique !

Le monde change et vite ! Les progrès en santé et en nouvelles technologies de la communication et de l'information remodelent notre économie. Les nouvelles énergies font fureur. C'est le monde de demain et il s'ouvre au débat car les sociétés s'y invitent.

À la croissance économique linéaire que nous connaissons depuis la fin du XIXe siècle se substituent l'économie de la connaissance avec notamment le biomimétisme dont les OGM font évidemment partie, l'économie circulaire avec la chasse au gaspillage, la réutilisation et le recyclage des métaux, du plastique, des bois, du papier, du verre, des composants électroniques...; l'économie collaborative par l'échange au sein des sociétés et entre les sociétés, la mise en réseau de l'information, de la connaissance, des cultures et des libertés démocratiques, la prise de décision citoyenne etc.; l'économie verte qui fait appel à une diminution drastique des gaz à effet de serre et qui cède la place à la préservation des sols, de l'eau douce, des mers, des lacs et des forêts à qui il faudra désormais donner un prix et non plus justifier de l'indice de performance sociale sur le seul indice de PIB.

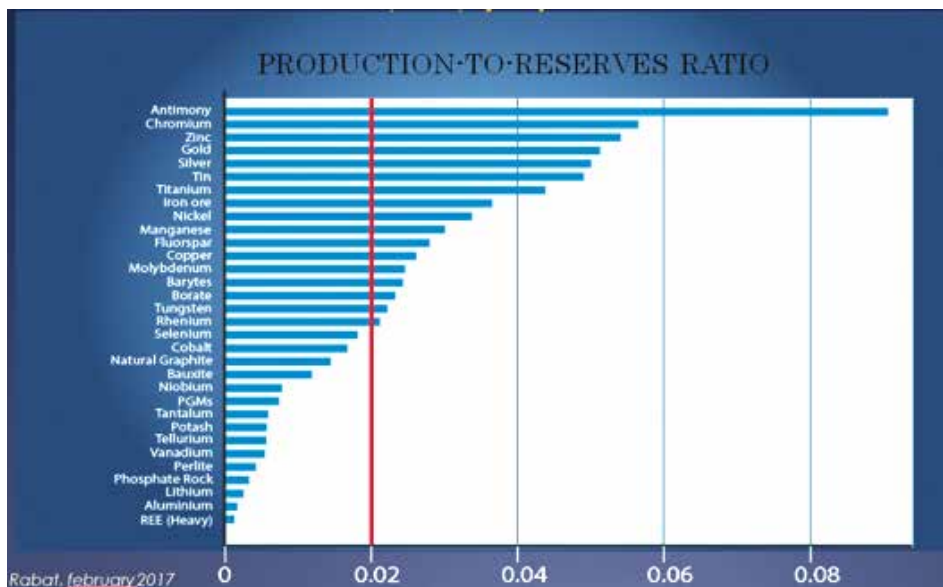


L'énergie verte peut être polluante:  
éoliennes avec aimants de générateurs contenant 600 kg de néodyme

Pour autant ces économies de substitution sont-elles dépourvues de danger? Non bien sûr. Les énergies vertes consommeront de nombreux métaux stratégiques et l'accaparement des réserves à venir engendrera de nouveaux conflits. Le cas des terres rares est démonstratif par exemple.

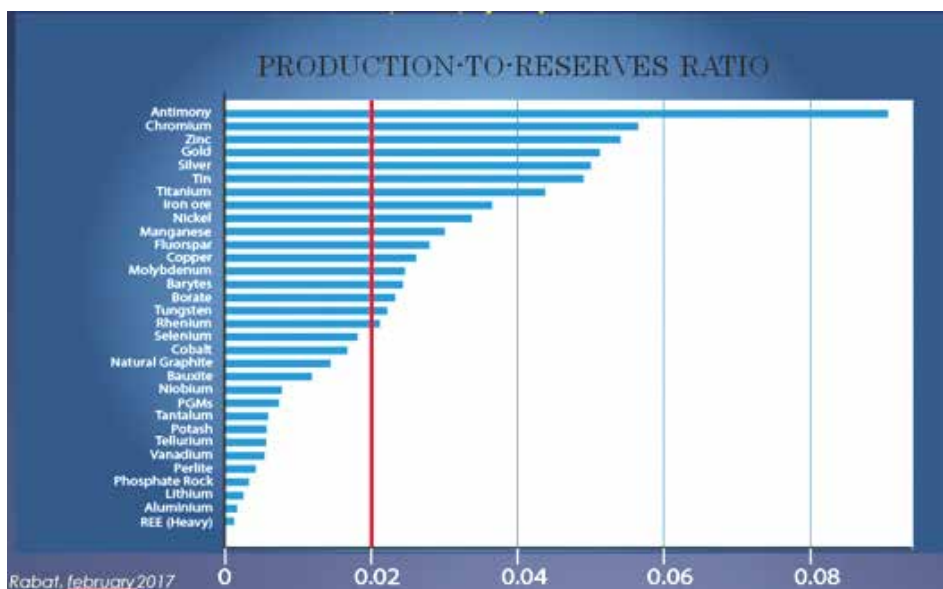
Pour qu'une éolienne soit performante, il faut y installer des générateurs contenant jusqu'à 600kg de néodyme qui, en soi, n'est pas radioactif, mais qui est extrait de roches qui le sont. Et les endroits où le néodyme est exploité ont une radioactivité de l'air bien supérieure à celle de Tchernobyl. Quant aux batteries électriques des véhicules, elles nécessitent dans leur fabrication des terres rares, dont le néodyme et le samarium. Le samarium a 7 isotopes naturels dont le Sm147 qui est radioactif.





L'économie verte ne sera pas rose: crise à venir des métaux

L'exploitation massive de ces minerais devrait jouer un rôle non négligeable sur l'économie de transition vers les énergies durables.



L'Afrique porte les terres promises de l'agriculture

**Académie Hassan II des Sciences et Techniques  
Km 4, Avenue Mohammed VI - Rabat.**

**Tél : 0537 63 53 77 • Fax : 0537 75 81 71**

**E-mail : [acascitech@academiesciences.ma](mailto:acascitech@academiesciences.ma)**

**Site internet : <http://www.academiesciences.ma>**



## Biographie



*Daniel NAHON est Docteur de 3<sup>o</sup> cycle de Géologie appliquée au Génie civil 1968.*

*Docteur ès-sciences de l'Université d'Aix-Marseille 1976.*

*Domaines de recherche : Géochimie et pétrologie des sols et altérations des pays chauds et notamment tropicaux (les latérites).*

*Fonctions actuelles : Professeur émérite, Aix-Marseille Université, Président du directoire de la recherche Aix-Marseille Université, Professeur à l'Institut d'Etudes politiques d'Aix-en-Provence, Professeur honoraire de l'Institut Universitaire de France, chaire de Science du sol, Conseiller scientifique de l'Europôle de l'Arbois, Membre de l'Académie des Sciences du Brésil.*

*Auteur d'environ 200 publications scientifiques, et 8 livres, 50 Conférences invitées dans congrès internationaux, Jury de 70 thèses et mémoires.*