PREMIÈRE PARTIE

CARBONE ET ÉNERGIE EN AGRICULTURE : QUELS ENJEUX ?

En lien avec la recherche de solutions pour limiter le réchauffement climatique, ces deux thèmes se sont invités au cœur des débats et discussions quotidiennes. Bien qu'ils soient très liés, ils n'en sont pas moins complexes et suscitent des passions et de nombreux raccourcis, notamment en ce qui concerne l'agriculture. Ce dossier vise à renforcer notre compréhension du sujet afin d'être bien armés pour construire demain des projets de valorisation de nos pratiques agricoles vertueuses.

SYLVAIN HYPOLITE

Équivalences énergétiques

Quelques calculs de coin de table pour appréhender l'énergie dans notre vie courante.

- Énergie cinétique : l'énergie d'un corps en mouvement = ½ masse x vitesse². 1 petite voiture (1 tonne) lancée à 100 km/h : 0,1 kWh d'énergie cinétique.
- Énergie thermique : l'énergie d'un corps liée à sa quantité de chaleur. Chauffer 1 l d'eau de 5 à 95 °C : 0,1 kWh d'énergie thermique transférée. Chauffer 30 m3 d'air de 10 à 20 °C : 0,1 kWh d'énergie thermique transférée.
- Énergie potentielle de pesanteur : l'énergie d'un corps en altitude liée à l'attraction terrestre. 1 tonne d'eau qui descend de 40 m : 0,1 kWh d'énergie de pesanteur « perdue » (sauf si turbinée dans un barrage). 1 humain de 80 kg qui grimpe 10 fois un coteau de 50 m de dénivelé : 0,1 kWh.
- Énergie chimique : l'énergie contenue dans les liaisons entre atomes d'une molécule. Combustion de 1 cl de fuel : 0,1 kWh (car on a vu que 1 l de fuel = 10 kWh).
- Énergie nucléaire ou atomique : masse x c² (E=mc² !)

Fission d'1 gramme d'uranium ≈ 2 tep ≈ 23 000 kWh !

Turbiner 1 tonne d'eau de 40 m de hauteur ou échauffer 1 l d'eau de 90 °C correspond au même transfert d'énergie que de brûler « 5 dés à coudre » de fuel …

Conclusion n° 1 : les énergies fossiles sont formidablement concentrées et faciles à utiliser ! Ce n'est pas pour rien que nous les utilisons massivement depuis 200 ans…

L'énergie : une grandeur centrale !

Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se… ? L'énergie est un mot que nous employons fréquemment dans la vie courante, mais est-ce pour autant simple d'en donner une définition qui tienne en une phrase ? Testez-vous avant de lire la suite !

Nous connaissons tous la phrase : « L'énergie est notre avenir, économisons-la »… En fait, nous allons voir que l'énergie a avant tout façonné ce que nous sommes (donc notre passé et notre présent) et que d'ailleurs, nous en sommes là parce que nous ne l'avons pas économisé !

L'énergie est une grandeur physique, elle caractérise le changement d'état d'un système. Chaque fois que quelque chose change autour de nous, de l'énergie entre en jeu :

- modification d'une température : chauffer un corps, c'est lui transmettre de l'énergie ; le refroidir c'est lui en enlever ;
- modification d'une vitesse : accélérer, c'est gagner en énergie cinétique ; freiner, c'est en perdre ;
- modification d'une composition chimique : nous y reviendrons, c'est la majeure partie de l'énergie que nous utilisons/transformons dans notre vie courante (pétrole, mais aussi aliments) ;
- modification d'une altitude, sous l'effet de la gravitation : une masse en altitude « contient » une énergie potentielle, qu'elle perd en descendant ; elle devra en regagner pour remonter ;
- modification d'une composition atomique : phénomènes de fusion et de fission nucléaires.

Or, l'énergie est indestructible, elle se conserve quoi qu'il arrive. C'est le premier principe de la thermodynamique : lors de toute transformation, il y a conservation de l'énergie.

Dans notre vie courante, lorsque nous consommons de l'énergie (terme impropre mais courant), nous transformons en fait une forme d'énergie en une autre, en récupérant au passage un service sous forme de travail mécanique (déplacement) ou de chaleur.

Compter les transferts d'énergie, c'est donc quantifier la transformation réelle du monde qui nous entoure. Pas de changement sans énergie, pas d'énergie sans changement.

Économiser l'énergie, c'est donc créer moins de travail au sens de « transformation »… Pourtant, toutes nos actions du quotidien en nécessitent ! Il convient donc de préciser quelles sont les « bonnes » et « moins bonnes » énergies !

Les formes d'énergie que nous utilisons

Pour évaluer différentes formes d'énergie, il faut introduire la notion d'unité. L'unité officielle pour quantifier l'énergie est le joule (symbole J, unité du système international), mais cette unité est peu utilisée en pratique. On lui en préfère 2 autres :

- le kWh « kilo watt heure ». L'énergie peut se quantifier comme le produit d'une puissance et du temps. Concrètement une machine d'une puissance de 1 000 W qui fonctionne pendant 1 heure va consommer (ou plutôt transformer) 1 000 W.h, soit 1 kWh d'énergie. Le kWh est notamment utilisé pour quantifier les énergies électriques ;
- la tep « tonne équivalent pétrole », très utile pour les énergies chimiques (pétrole, gaz, charbon…). Dans les ordres de grandeur, on peut retenir qu'une tonne de pétrole contient environ la même quantité d'énergie qu'une tonne de charbon ou qu'une tonne de gaz. 1 tep = 11 630 kWh. Encore plus simple à retenir dans la vie

de tous les jours : 1 l de fuel = 10 kWh (arrondi).
Au-delà de transformer ou consommer l'énergie, ce que nous recherchons dans nos usages quotidiens professionnels et personnels, c'est du travail mécanique (mouvement, déplacement) ou du transfert thermique (de la chaleur ou du froid). Pour cela nous utilisons des convertisseurs d'énergie que sont les machines, alimentées par une nourriture prévue à leur effet (fuel, gaz, charbon, électricité…). À bien y réfléchir, l'écrasante majorité de nos actions quotidiennes, professionnelles ou personnelles, consistent à actionner des machines, nourries par une forme d'énergie adéquate ou encore à utiliser des dispositifs qui eux-mêmes ont été produits à partir de ressources naturelles transformées par des machines grâce à une source d'énergie (maison, route, tracteur, machine à café, Smartphone…). Le parc de machines moyen mis en œuvre tous les jours par un Français moyen (de la centrale électrique à gaz jusqu'à l'ordinateur en passant par le tracteur et le camion qui le nourrissent) équivaut à la force de travail de 600 humains. En d'autres termes, on peut dire que nous utilisons l'équivalent de 600 esclaves énergétiques au quotidien.

Combien ça coûte ?

On le sait tous, *« Ça coûte trop cher »* ! *« Et en plus, c'est que des taxes »* ! Pas faux, les taxes représentent environ 60 % des factures énergétiques (essence ou électricité) et pas faux non plus, les dépenses énergétiques pèsent déjà lourdement sur nos budgets, notamment en agriculture. Mais à y calculer de plus près, combien coûte un kWh d'énergie mécanique humaine ?
Si on travaille toute la journée de ses bras et de ses jambes, on peut produire environ 0,5 kWh d'énergie mécanique (50 Watts sur un vélo pendant 10 h, c'est déjà fatigant). Si on fait cet effort physique 300 jours par an, on a produit à la fin de l'année 150 kWh d'énergie mécanique, ce qu'un moteur thermique moyen peut faire en consommant… 45 l d'essence (avec un rendement mécanique de 33 %) ! Notre force de travail manuel annuelle est donc équivalente au service que peuvent nous rendre 45 l d'essence… qui valent la modique somme de 70 €.
Avec l'électricité, les ordres de grandeur sont les mêmes : 10 kWh d'électricité valent environ 1,50 €, exactement comme 1 l de fuel ou d'essence. On retombe sur nos pieds : l'électricité coûte le même prix que les carburants (il y a en revanche une différence de rendement mécanique entre moteurs électriques et thermiques). Qui a dit que l'énergie était chère ?

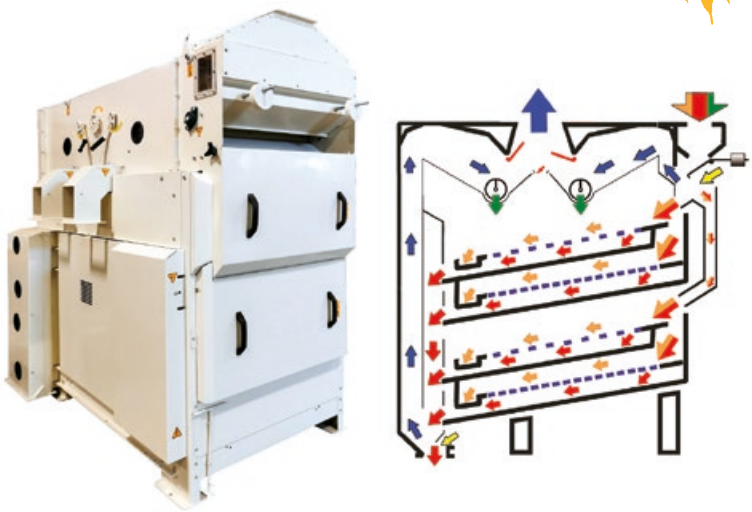
Elle est où la source ?

Sans surprise, les énergies fossiles carbonées (pétrole, charbon et gaz) constituent l'écrasante majorité de notre consommation d'énergie (81 % en 2017, monde). Cela se fait souvent de manière cachée, notamment par la consommation d'électricité produite à base de charbon (près de 40 % de l'électricité mondiale).
Autre fait intéressant, on peut se laisser convaincre que ce mix énergétique fossile date de l'ancien monde. Il n'en est rien car les 3 sources d'énergie qui ont le plus augmenté en valeur absolue ces 15 dernières années sont respectivement le charbon, le gaz et le pétrole.
À titre d'exemple, de 2000 à 2015, l'utilisation du charbon a augmenté 26 fois plus que le solaire photovoltaïque et 8 fois plus que l'éolien…
Cette hausse des énergies fossiles est surtout réelle dans la production électrique (transformation d'une énergie primaire en énergie finale utilisable par un consommateur) qui, à l'échelle mondiale, ne cesse encore aujourd'hui de se carboner. Pas besoin d'aller accuser les lointains

INSTALLATIONS PERREAULT

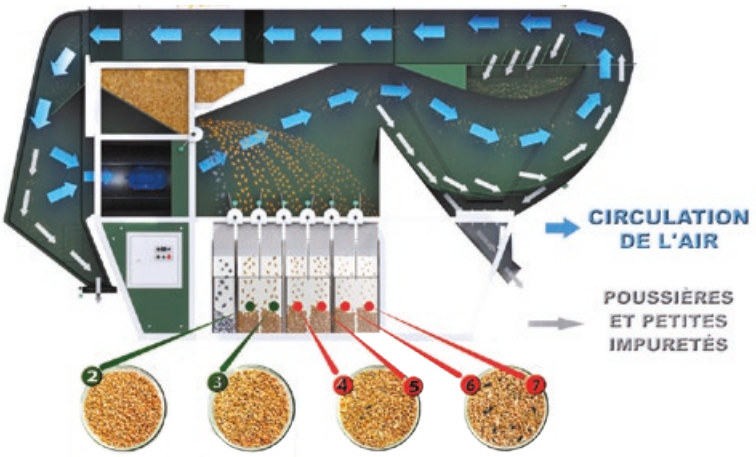
TRIEUR À GRAIN

Séparateur à grilles



Séparer et nettoyer vos céréales

Calibreur à air



Nettoyer et calibrer vos grains
Réaliser vos semences

Découvrez toutes nos gammes de trieurs sur

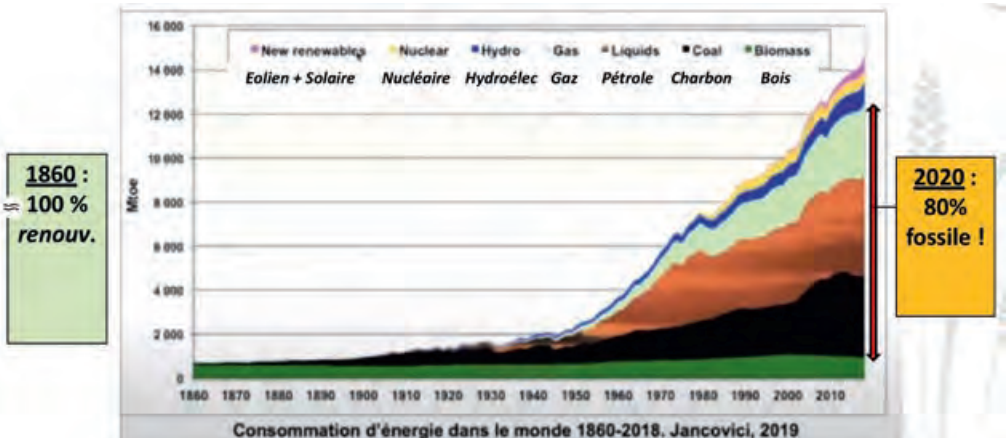
YouTube

✆ 07 64 02 49 12

49650 Allonnes - France - www.yperreault.fr

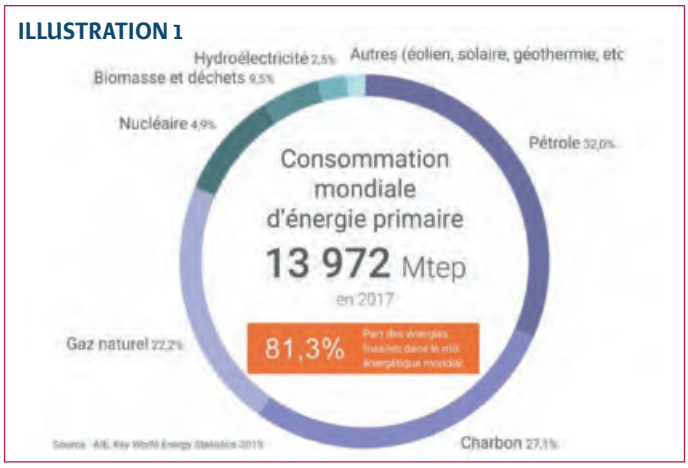
Chinois et Indiens, plusieurs pays européens sont assez grands pour carboner eux-mêmes leur production électrique !
En France, nous n'avons pas de pétrole, mais des idées (il parait !) Une idée circule fréquemment dans le débat public disant que la France est un pays « tout nucléaire » : il n'en est rien puisque, certes notre électricité est produite pour 70-75 % par la fission nucléaire, mais la consommation électrique représente 25 % environ de l'énergie totale que nous consommons sur le territoire. Notre pays est donc à 18 % nucléaire, pas tout nucléaire !
Notre mix énergétique français est au global lui aussi à 75-80 % d'origine fossile (dont 100 % d'imports d'ailleurs). Pour finir sur cet horizon des ressources énergétiques, il convient de préciser que l'explosion de la consommation énergétique (par habitant, mais aussi au global) a été concomitante avec l'amélioration de notre confort de vie moderne.
La transition énergétique 100 % renouvelable => 80 % fossile s'est ainsi faite en 2 siècles (illustration 2), permettant au passage de décupler la population terrestre et de permettre à chacun de consommer 4 fois plus d'énergie par personne.
Dans le même temps, les campagnes se sont progressivement vidées au profit des usines, puis des bureaux, imposant de fait à l'agriculture de produire de plus en plus avec de moins en moins d'énergie humaine. Il est intéressant de noter que les périodes de grande prospérité économique collent très bien aux périodes d'augmentation rapide de la consommation d'énergie. Globalement, quantité d'énergie consommée et richesse produite sont ainsi très liées. Ainsi, pour produire plus de richesse et économiser l'énergie car ce serait notre avenir, il faut inventer un modèle que nous n'avons JAMAIS réussi à trouver jusqu'à maintenant. Chiche ?

ILLUSTRATION 2



Consommation d'énergie dans le monde 1860-2018. Jancovici, 2019

ILLUSTRATION 1



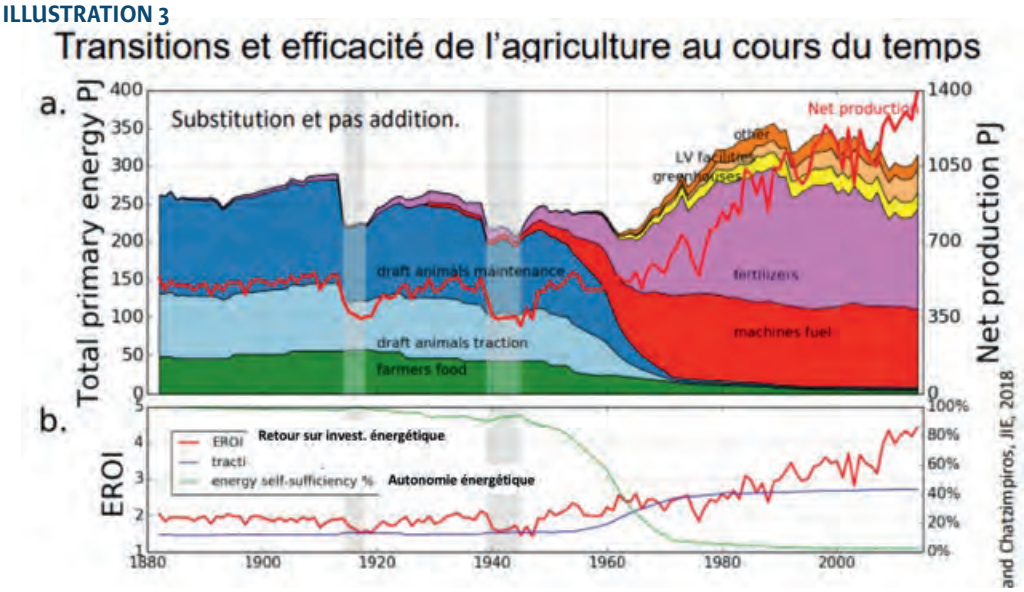
L'énergie en agriculture : producteurs ou consommateurs ?

En tant qu'agriculteur, êtes-vous producteur ou consommateur net d'énergie ?
C'est-à-dire en cumulant ce que vous produisez comme énergie utile (grains, fruits, viande, etc.) et en soustrayant ce que vous consommez pour produire (fuel, engrais, gaz, électricité, etc.), le bilan est-il positif ? Posez-vous la question avant de lire la suite. Heureusement oui, mais voyons de combien ? L'illustration 3 est riche d'informations et mérite quelques commentaires.

+ d'infos

Si vous n'avez pas le N° 113 de *TCS* en main et que vous souhaitez lire la suite de cet article, vous pouvez le commander au 03 87 69 18 18. Pour plus d'information sur les TCS, le semis direct et les couverts végétaux, nous vous donnons également rendez-vous sur : www.agriculture-de-conservation.com

ILLUSTRATION 3



Sur l'échelle de gauche, vous retrouvez le cumul d'énergie consommée par la ferme monde de 1880 à nos jours (en PJ = millions de milliards de joules !) On remarque que l'on est passé de consommation d'énergie par les agriculteurs (nourriture, en vert) et la traction animale (en bleu) à de l'énergie fossile : fuel et fertilisants majoritairement. Il est intéressant de noter qu'au global, il y a eu substitution des formes d'énergie et non pas addition. Autrement dit, globalement et contrairement aux idées reçues, on ne consomme pas plus d'énergie aujourd'hui en agriculture qu'il y a 150 ans ! Sur l'échelle de droite, le trait rouge nous donne la production d'énergie issue de la ferme monde, sous forme d'aliments (également en PJoules, mais attention, échelle différente). La production énergétique mondiale d'aliments a plus que doublé sur la même période.

Sur le graphique du bas, le trait rouge donne le taux de retour énergétique (EROI = energy return on invest = quantité d'énergie produite par rapport à l'énergie investie), qui est passé de 2 à plus de 4 : l'agriculture produit donc 4 fois plus d'énergie qu'elle n'en consomme. Comment est-ce possible puisqu'on sait que l'énergie se conserve ? Le secret est la photosynthèse qui est une source d'entrée énergétique gratuite dans le système. Autrement dit, vous agriculteurs, consommez « 1 » d'énergie externe et captez « 3 » de photosynthèse pour produire « 4 » unités d'aliments. Trop forts !

Enfin, la courbe verte nous renseigne sur l'autonomie énergétique de nos systèmes (% d'énergie consommée qui a été produite sur place), passée sans surprise de 100 % à moins de 5 % actuellement.

L'agriculture est énergétiquement très efficace (grâce à la

conversion de l'énergie solaire en aliments), mais par ailleurs devenue très dépendante des ressources fossiles.

La production énergétique en grandes cultures

Les grains

On peut estimer la valeur énergétique des grains exportés de la parcelle par leur pouvoir calorifique inférieur (PCI = énergie disponible par combustion).

■ Les céréales (grains et pailles) ont un PCI compris entre 4 et 4,3 kWh/kg (pour H_2O=15 %).

■ Les graines d'oléagineux ont un PCI compris entre 5 et 7 kWh/kg (pour H_2O=9 %).

Pour mémoire, le fuel a un PCI d'environ 10 kWh/kg.

L'illustration 4 donne la production d'énergie des principales cultures en équivalent litre de fuel/ha/an. Cette énergie est une forme d'énergie primaire ; il faut prendre en compte les facteurs de pertes pour obtenir l'énergie finale réellement utilisable (transformation par les animaux, etc.), mais cela donne un ordre de grandeur intéressant : 1 ha de blé à 70 quintaux produit l'équivalent énergétique de près de 3 000 l de fuel !

L'électricité photovoltaïque

Aujourd'hui 1 kWc = 5 m² de panneaux produit environ 1 250 kWh/an dans le Sud-Ouest, soit un équivalent 125 l de fuel/an. Un bâtiment de 500 m² de panneaux produit l'équivalent en énergie de 125 000 kWh/an soit 12 500 l de fuel/an soit encore l'équivalent de production énergétique de 4 à 5 ha de blé.

ILLUSTRATION 4

	Pouvoir calorifique (kWh/kg)	Rdt (t/ha/an)	Production d'énergie (kWh/ha/an)	Production d'énergie (éqFuel/ha/an)
Grains aux normes				
Blé / Orge	4,17	7,2	30 024	**2 887**
Maïs	4,3	12	51 600	**4 962**
Tournesol	5,56	2,7	15 012	**1 443**
Colza	6,83	3,4	23 222	**2 233**
Paille à 15%				
Paille de blé	4	5	20 000	**1 923**

La méthanisation

Pour la méthanisation, on peut retenir le chiffre suivant : production de 250 Nm³ de méthane (CH_4) / tMS, soit environ 250 équivalent l fuel/tMS.

Avec une hypothèse de 8-15 tMS/ha exportée de la parcelle et méthanisée, on obtient une production de 2 000-3 750 l éqfuel/ha/an (proche des valeurs énergétiques obtenues avec une production de grains). Attention, si le gaz est injecté dans le réseau, l'énergie est à presque 100 % disponible au consommateur final, et il s'agit d'une énergie concentrée et efficace. En revanche en cogénération, 45 % est convertie en électricité, le reste étant principalement perdu sous forme de chaleur, car souvent mal valorisé.

La consommation énergétique en grandes cultures

Il est intéressant de quantifier les différents postes de dépense ou consommation énergétique, par type d'intrant et pour chaque culture.

L'illustration 5 synthétise le suivi énergétique réalisé dans le cadre du projet Casdar TTSI (techniques très simplifiées d'implantation) qui regroupait 60 fermes de grandes cultures du Sud-Ouest, principalement en agriculture de conservation des sols, suivies de 2009 à 2012.

En moyenne sur ce réseau de 60 fermes en ACS (dont 10 adhérents Agro d'Oc), la consommation énergétique est de 390 éq l fuel/ha/an, dont 46 % pour la fertilisation (principalement azotée) et 15 % pour le carburant.

La référence nationale pour des fermes similaires de grandes cultures conventionnelles (référence Planète-GES Solagro) est de 470 éq l fuel/ha/an, dont 49 % pour la fertilisation et 21 % pour le carburant. Exprimée à la quantité produite, la référence grandes cultures nationale est de 98 éq l fuel/tonne MS produite.

Ce qui est très notable, c'est le poids de la fertilisation azotée dans la consommation énergétique de chaque culture – hors légumineuses bien sûr.

Pour autant, l'azote fixé par les légumineuses est-il gratuit énergétiquement ? Non bien sûr, les calculs montrent qu'une unité d'azote symbiotique fixée par la légumineuse lui coûte l'équivalent énergétique de 0,5 litre de fuel, consommé sous forme de sucres par les bactéries dans les nodosités : autant d'énergie en moins pour faire des graines, ce qui explique en partie le moindre rendement des légumineuses…

Il n'y a pas de miracle, si le blé et le maïs étaient autosuffisants en azote, ils le seraient au détriment de leur rendement en grain. C'est notamment parce que nous injectons de l'énergie externe dans le système sous forme d'azote minéral que les rendements sont élevés.

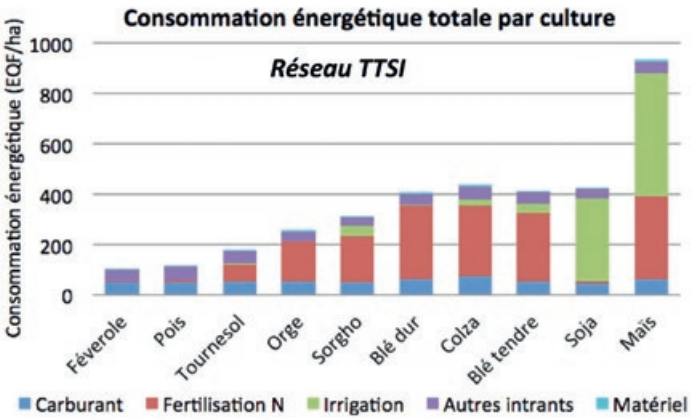
Concernant le carburant, les marges de manœuvre existent mais viennent en second ordre :

■ consommation moyenne ferme grandes cultures France : 125 l fuel/ha/an ;

■ consommation moyenne réseau TTSI : 55 l fuel/ha/an.

L'économie énergétique liée au carburant est donc réelle en ACS (environ -50 % soit 70 l/ha de fuel économisé). Cela représente tout de même l'équivalent de la consommation de 1 000 km pour une voiture moyenne sur chacun des hectares et tous les ans. Encore une fois, c'est important mais pas si significatif si la fertilisation azotée reste inchangée. Pourtant, on le sait, agronomi-

ILLUSTRATION 5



Produire de l'azote est coûteux en énergie !

La fertilisation azotée d'origine minérale pèse pour 50 à 80 % de la consommation énergétique globale des grandes cultures ! C'est une consommation que l'on ne perçoit pas au quotidien, mais la production d'engrais azotés est énergivore. Mettre 180 unités d'azote revient à injecter l'équivalent énergétique de 180 l de fuel dans le système.

ILLUSTRATION 6

Synthèse de l'ammoniac : $N_2 + 3\ H_2 \rightleftharpoons 2\ NH_3$

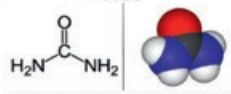
Azote de l'air = « gratuit » — Hydrogène qui doit être produit — Ammoniac

Méthane

$CH_4 + 2\ H_2O \rightleftharpoons CO_2 + 4\ H_2$

Synthèse des engrais azotés : chimie basée sur l'ammoniac
+ acide nitrique (oxydation ammoniac) => ammonitrates
+ acide sulfurique => sulfate d'ammoniac
+ CO_2 => Urée

Urée



Rendement énergétique de la synthèse d'ammoniac :
- **1 t d'unités Azote** pour un équivalent de **1 tep** (gaz naturel, avec émissions 2,3 tCO_2)

+ acheminement et épandage en parcelles...

À RETENIR

1 uN minéral équivaut à 1 l de GNR (en contenu énergétique)

quement en ACS, il est fortement déconseillé de diminuer les apports d'azote, et l'autofertilité, malgré des couverts végétaux performants, met du temps à se construire. Pas facile comme équation !

Enfin ce calcul ne tient pas compte de l'énergie indirecte que représentent les équipements et les machines (énergie consommée par les mines, pour fondre et usiner le métal, pour les pneumatiques, le transport et l'entretien). Au regard de plusieurs sources, celle-ci serait, à peu de chose près, relativement équivalente à l'énergie directe. Présenté autrement, lorsque vous consommez 200 l de carburant (énergie directe) avec un ensemble tracteur/outil, vous consommez environ autant d'énergie indirecte : ce qui pousse le compteur global à tout de même 400 l. Cet aspect renforce néanmoins l'intérêt de l'ACS et dans la situation où nous sommes, toute économie est bonne à prendre.

Concernant l'irrigation, la consommation énergétique dépend surtout du type d'installation :

- pivot : 0,39 kWh/m³ ; jusqu'à 0,7 kWh/m³ avec dénivelé + énergie au fuel ;
- couverture intégrale : 0,41 kWh/m³ ;
- enrouleur : 0,56 kWh/m³ ; jusqu'à 1,5 kWh/m³ avec dénivelé + énergie au fuel.

Et en AB ?

Les références « Planète-2010 – Solagro » donnent les chiffres suivants : consommation de 261 l éqFuel/ha/an, dont 47 % pour le carburant, 23 % pour l'irrigation et 12 % pour la fabrication du matériel. C'est environ la moitié de la consommation énergétique du conventionnel en consommation brute.

Comme la production est inférieure, le bilan est de 981 éq-Fuel/tonne MS produite, soit exactement la même valeur qu'en conventionnel.

Attention : dans ces chiffres n'est pas prise en compte l'origine initiale minérale de l'azote organique fréquemment utilisé en AB (engrais organiques issus d'animaux nourris avec du grain produit avec de l'azote conventionnel).

Énergétiquement, le meilleur système serait ainsi un système avec des rendements plutôt élevés (grains ou autre biomasse) et une faible dépendance à l'azote de synthèse. Les légumineuses en culture et couvert ainsi que le recyclage des matières organiques (origines animales et humaines) sont ainsi les meilleures pistes.

SYLVAIN HYPOLITE

Couvert de féveroles avant un maïs semences.

Bilan et indépendance énergétique

Nous avons vu qu'en grandes cultures, la production énergétique est de l'ordre de 2 500 à 3 000 l éqfuel/ha/an, nécessitant une consommation de l'ordre de 500 l éqfuel/ha/an.

Cela fait de l'agriculture un secteur très performant énergétiquement (seul secteur qui produit de l'énergie : 5 fois plus en sortie qu'il n'en consomme), avec toutefois une dépendance à quasi 100 % aux énergies fossiles pour les intrants.

Si on souhaitait redevenir indépendant énergétiquement sur

la ferme, on peut calculer que près de la moitié des surfaces devraient être dédiées à la production énergétique. Exemple : 1 ha de tournesol donne environ 23 q, soit 1 t d'huile/ha. Or la consommation annuelle totale sur une ferme est d'environ 470 l de fuel/ha (voir plus haut). Notre hectare de tournesol permettra donc de dégager assez d'énergie pour lui et pour un seul autre hectare !

Finalement, ce n'est pas si différent d'il y a 150 ans où une bonne partie des terres était dédiée à la production de fourrages pour la traction et les engrais animaux.

L'énergie fossile abondante et bon marché a en fait libéré des surfaces pour produire davantage et donc nourrir davantage.

Houston, on a 2 problèmes !

La raréfaction des énergies fossiles

Comme leurs noms l'indiquent, le pétrole, charbon et gaz sont des énergies fossiles. Elles se sont naturellement créées il y a plusieurs dizaines/centaines de millions d'années et ne se renouvellent pas à l'échelle des temps humains. Il est donc certain que leur stock est fini.

Si le robinet ne se fermera pas demain ni même dans 10 ans, plusieurs éléments physiques (et non économiques) montrent que le pic d'extraction annuelle est proche de nous : l'Agence internationale de l'énergie a annoncé en 2018 que 2007 a probablement été l'année du pic (= maximum d'extraction annuelle) pour le pétrole conventionnel, les pétroles non conventionnels permettant pour l'instant de maintenir une très légère croissance (https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018).

Atteindre le pic ne signifie pas tarir la source du jour au lendemain. La crainte est qu'un arrêt de la croissance de l'offre énergétique ne puisse pas être compensé par d'autres sources d'énergie qui prendraient le relais.

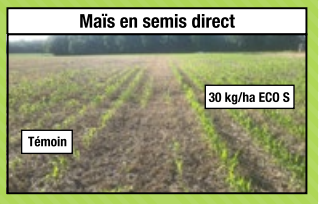
À ce titre, les nouvelles énergies renouvelables (éolien, solaire PV) ne semblent pas à même de prendre le relais d'une demande énergétique toujours croissante (si elles peuvent l'être politiquement, c'est moins sûr dans la réalité). Surtout si on décide dans le même temps de les utiliser pour remplacer une source d'énergie déjà décarbonée (le nucléaire) et ainsi se tromper complètement de combat…

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées aux énergies fossiles

Ce sujet est également très discuté et documenté. Le consensus scientifique est large sur la réalité d'un changement climatique lié aux émissions de GES d'origine humaine. Là où le consensus est en revanche inexistant, c'est sur les moyens à mettre en œuvre pour contrer ce phénomène.

Des solutions alternatives en filière courte

Engrais Foliaires et solutions fertilisantes innovantes :
Soufre élémentaire, Borat, Oligo-éléments, chélatés ou non



Une plante en bonne santé, c'est une plante bien alimentée

De nombreuses formulations pour l'agriculture biologique sont également proposées.

BILLECO

Pour tout conseil ou demande, vous pouvez nous contacter par mail pour un retour dans les meilleurs délais.
www.billeco.fr billeco74@gmail.com

On peut simplifier en présentant 2 écoles.

■ Continuer à produire donc consommer régulièrement davantage, mais compter sur 3 moyens pour diminuer les émissions de GES :

- améliorer l'efficacité énergétique des machines : je produis davantage avec autant d'énergie ;
- utiliser des énergies moins émettrices de GES : j'émets moins en produisant autant ;
- stocker les GES émis : par des techniques industrielles ou naturelles (c'est la suite de cet article !)

■ Produire moins, donc consommer et émettre moins… Mais en renonçant volontairement à nos standards de vie ? Alors qu'en parallèle la population mondiale augmente encore ?

Le dernier rapport du GIEC estime que pour tenir l'objectif des 2 °C de réchauffement depuis la période pré-industrielle (nous sommes actuellement à 1,5 °C embarqués dans le système avec les émissions passées), il faut diviser nos émissions de GES par 3 d'ici à 2050 à l'échelle mondiale. Cela signifie les diminuer de 5 % tous les ans (l'équivalent d'un Covid **supplémentaire** tous les ans).

Si la tendance actuelle est maintenue, les modèles prévoient entre +4 et +8 °C de moyenne, ce qui ne manquerait pas de perturber profondément l'équilibre climatique mondial, mais aussi beaucoup d'autres équilibres !

Vous avez dit carbone et énergie ?

Le carbone occupe naturellement une place centrale dans la composition de la matière qui nous entoure. La branche de la chimie liée au carbone s'appelle la chimie organique, de la même manière que les matières structurées autour du carbone sont nommées les matières organiques.

L'atome de carbone a la particularité de devoir se lier 4 fois avec un autre atome (on dit qu'il a une valence de 4), cela peut être soit un autre carbone, un hydrogène (valence 1), un oxygène (valence 2), un azote (valence 3), etc. On comprend donc qu'il se retrouve naturellement au centre des molécules organiques.

Où se trouve le carbone ?

Toutes les matières organiques, c'est-à-dire du vivant ou issues du vivant, contiennent une proportion importante de carbone : environ 50 %, ordre de grandeur à retenir.

Les principaux réservoirs de carbone organique sur la planète sont en premier lieu les sols (2 400 Gt), puis les plantes (450 Gt), les bactéries (70 Gt), les champignons (12 Gt), l'ensemble des animaux arrivant loin derrière (avec seulement 2 Gt).

Pour la petite histoire, il y a environ 3 fois plus de biomasse de vers de terre et également 3 fois plus de biomasse de virus sur terre qu'il n'y en a… d'humain ! À ce stade, il faut bien avoir en tête la différence entre stock (quantité dans un compartiment à un instant donné) et flux (variation de stock, passant d'un compartiment à un autre). La distinction de ces notions sera très utile dans la suite de ce dossier.

Le carbone est le premier intrant agricole, bi-fonction et gratuit !

On le sait, mais il faut le rappeler et le dire, l'activité agricole

D'un point de vue pragmatique, nous analyserons dans un prochain dossier comment l'agriculture peut jouer sur les 2 leviers suivants :
■ réduire les émissions de GES ;
■ compenser une partie des émissions de GES par un stockage de carbone dans les sols.

L'exemple du corps humain

En zoomant sur du concret pour mieux se rendre compte, prenons l'exemple du corps humain (80 kg).
Parmi ces 80 kg, la majorité est de l'eau (65% environ).
Sur la matière sèche (28 kg), le carbone représente 50 %, soit 14 kg environ.
En nous alimentant normalement, nous ingérons 80 kg de C/an, ce carbone étant issu d'une plante ou d'un animal (et donc d'une plante avant) par transformation du CO_2 par photosynthèse.
L'illustration 7 montre qu'une très grande partie de ce carbone ingéré est rejetée sous forme de CO_2 par la respiration (93 %) ; le cycle est ainsi bouclé.

ILLUSTRATION 7

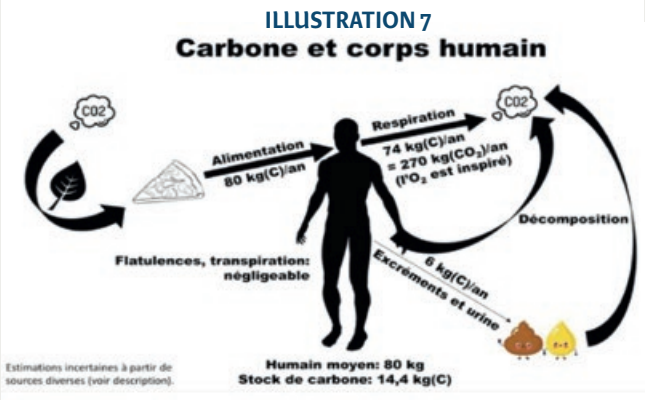


ILLUSTRATION 8

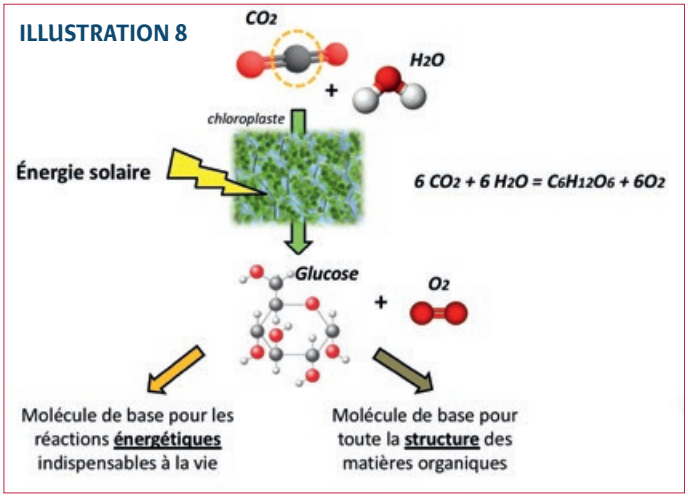
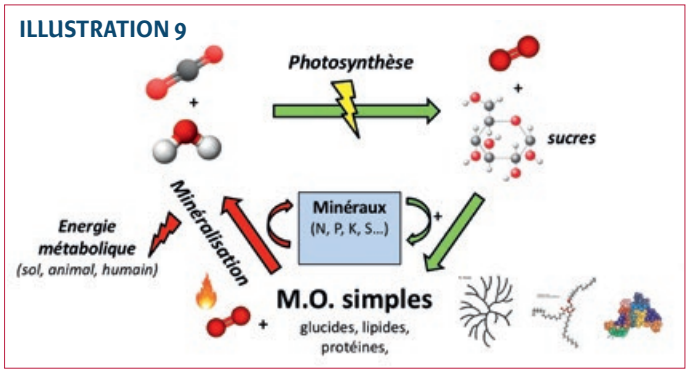


ILLUSTRATION 9



consiste avant tout à produire des végétaux grâce à la photosynthèse. C'est l'origine de toutes les matières organiques : végétaux, puis animaux, puis matières organiques du sol…

Ce que l'on sait moins est que ces matières organiques ont à la fois une fonction de structure (au sens de matériaux) et une fonction énergétique (du carbone… énergétique !)

En effet, comme le montre l'illustration 8, le mécanisme de photosynthèse (simplifié ici) aboutit, pour la grande majorité des plantes, à la formation de glucose, un sucre qui est à la fois l'élément de base de toutes les molécules de structure qui fabriquent en quelque sorte, l'architecture des plantes (cellulose, hémicellulose, lignine, et même des protéines après transformations et ajout de N et S), mais aussi à la base des molécules riches en énergie qui sont utiles à toute la chaîne alimentaire (amidon, saccharose et même les huiles…). Pour illustrer cette idée, on peut se rappeler qu'on se sert du bois à la fois comme matériau de construction et comme combustible.

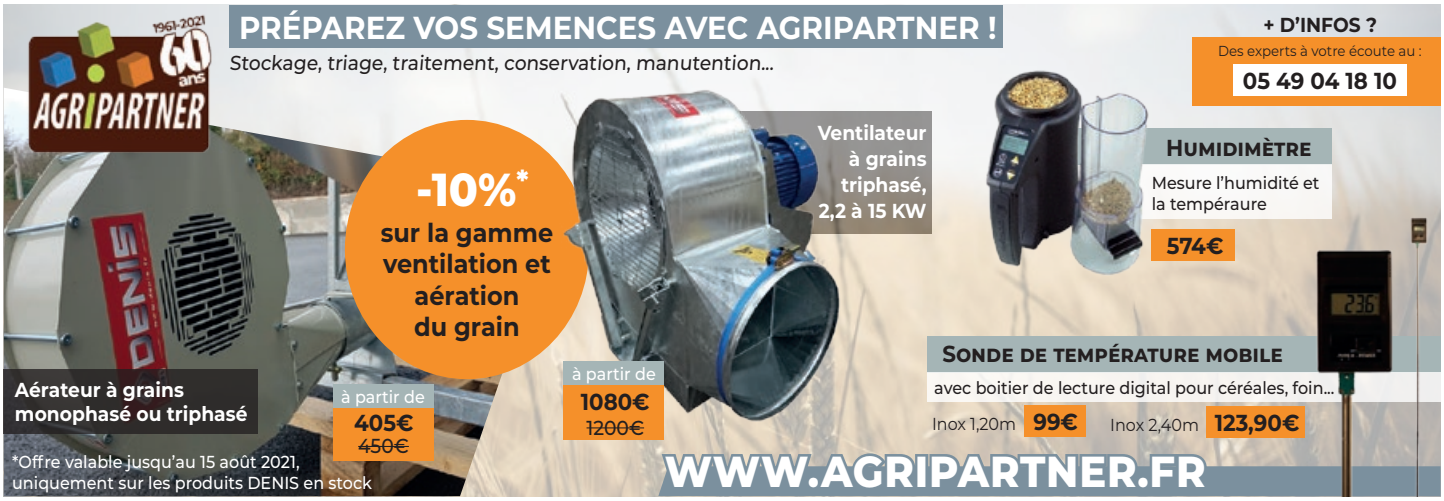
À retenir : les matières organiques sont à la fois des matériaux de structure et des combustibles, véritables réservoirs d'énergie pour les organismes qui les consomment.

L'illustration 9 complète la précédente en précisant les mécanismes qui permettent de boucler le cycle du carbone par le vivant :

■ **photosynthèse** = collecte du carbone oxydé de l'air (CO_2), pauvre en énergie, et transformation en sucres (carbone réduit, riche en énergie). Cette étape consiste à transférer l'énergie lumineuse sous forme d'énergie chimique (c'est une réduction du carbone) ;

■ **synthèse par le vivant** de toutes les formes complexes de matières organiques, grâce à l'ajout de minéraux N, P, K, S, oligos, etc. : sucres, protéines, lipides, puis cellulose, amidon, hémicellulose, lignine, mais aussi enzymes, hormones, etc.

■ **minéralisation des matières organiques** par l'organisme qui les respire. Il récupère ainsi une partie des éléments qui les composent mais surtout l'énergie contenue dans les liaisons carbonées : une vache minéralise (ou oxyde) de l'herbe, de la même manière que nous miné-



ralisons un steak (de vache !) ou qu'une bactérie du sol minéralise une tige de féverole. L'énergie chimique est ainsi utilisée par l'organisme qui minéralise ; le carbone repart dans l'atmosphère sous sa forme oxydée, pauvre en énergie : le CO_2. La partie des minéraux non fixée par le consommateur est minéralisée et de nouveau disponible pour le prochain cycle.

À retenir : le processus de photosynthèse / synthèse des molécules complexes / minéralisation est un cycle Red/Ox fermé du carbone et des minéraux, qui permet de transférer l'énergie solaire vers les êtres vivants. Il est limité par 2 choses : la quantité de photosynthèse (= quantité d'énergie en entrée) et la quantité de minéraux dans cette boucle (le risque étant de perdre des minéraux en route car minéralisés à un autre endroit duquel ils ont été prélevés).

ILLUSTRATION 10

	Teneur en N (%)	Rdt (t/ha/an)	Exportation N (kN/ha/an)
Grains			
Blé à 14% prot	2,2 %	7,2	158
Blé à 11% prot	1,8 %	8	144
Maïs	1,2 %	12	144
Tournesol	2,4 %	2,7	65
Colza	2,9 %	3,4	99
Féverole	3,8 %	3	114
Résidus			
Paille de blé	0,6 %	5	30

Perdre des minéraux, c'est se priver d'énergie !

Nous venons de voir que le premier élément limitant du cycle du vivant est la quantité de photosynthèse. Concrètement, dans nos systèmes agricoles, cela signifie que pour maximiser l'entrée d'énergie gratuite, il faut maximiser la photosynthèse, c'est-à-dire couvrir les sols avec des plantes vivantes et performantes le plus souvent possible. Ne pas faire cela oblige forcément à recourir à de l'énergie externe (souvent fossile) pour produire beaucoup d'aliments (carburants, azote de synthèse).

Le second élément limitant est plus difficile à gérer : il s'agit de la perte d'éléments minéraux, qui sortent du cycle.

En effet, même avec une restitution complète des résidus de cultures et des couverts végétaux au sol, le propre de l'agriculture est d'exporter a minima les grains de la parcelle. L'illustration 10 (tableau) donne une idée des quantités d'azote exportées par les grains pour différentes cultures.

Concrètement, entre 100 et 150 kg N/ha/an sont exportées et perdues localement pour le sol car ces minéraux ne sont que trop rarement restitués sur place : au mieux, ils sont transférés dans un élevage sur la ferme ou dans le voisinage mais la grande majorité finie davantage dans les boues de Step, donc dans les rivières puis les fleuves, avec même une partie dans l'air pour l'azote. Le même calcul peut être fait pour le P, K, S, etc. Cette estimation ne tient pas compte des pertes minérales par ruissellement ou érosion qui peuvent être, elles aussi, très importantes. Elles sont d'ailleurs d'autant plus regrettables qu'elles n'apportent aucun service et même entraînent des coûts de nettoyage et de dépollution qui sont encore une dépense énergétique dont il serait possible de se passer.

Ce n'est donc pas (seulement) l'agriculteur qui eutrophise les rivières et océans avec des usages massifs d'engrais de synthèse, mais au moins autant, nos collègues citadins qui restituent leurs minéraux ingérés au mauvais endroit… Peut-être devrions-nous leur rappeler qu'ils s'assoient sur une formidable mine… d'énergie !

L'énergie est source de toutes nos activités, de la plus basique à la plus sophistiquée. L'agriculture est au carrefour des transformations énergétiques en collectant depuis toujours une énergie renouvelable qu'est la lumière pour en faire des aliments et des matériaux et, de plus en plus, de l'énergie à machine utilisable par la société.

Forte de sa formidable efficacité énergétique acquise depuis plus d'un siècle, elle doit, dans les prochaines décennies, réussir une transition sûrement encore plus rapide pour préparer un monde qui sera de gré ou de force moins fossile, mais probablement aussi énergétique.

Dans un prochain dossier nous compléterons l'analyse des flux énergétiques agricoles par l'analyse de ses flux de carbone et notamment le fameux CO_2.

Sylvain HYPOLITE – AGRO D'OC

agriculture-de-conservation.com
est heureux de mettre à votre disposition cet article issu de la **revue TCS**.

La vocation du site est d'encourager le partage d'informations dans l'objectif d'assurer la promotion d'une agriculture vertueuse, productive et soucieuse de préserver les sols.

Dans cette optique, vous pouvez faire libre usage du contenu de cet article, le diffuser, l'utiliser à la condition d'indiquer son origine.

Merci de jouer le jeu !

TCS
Techniques Culturales Simplifiées