

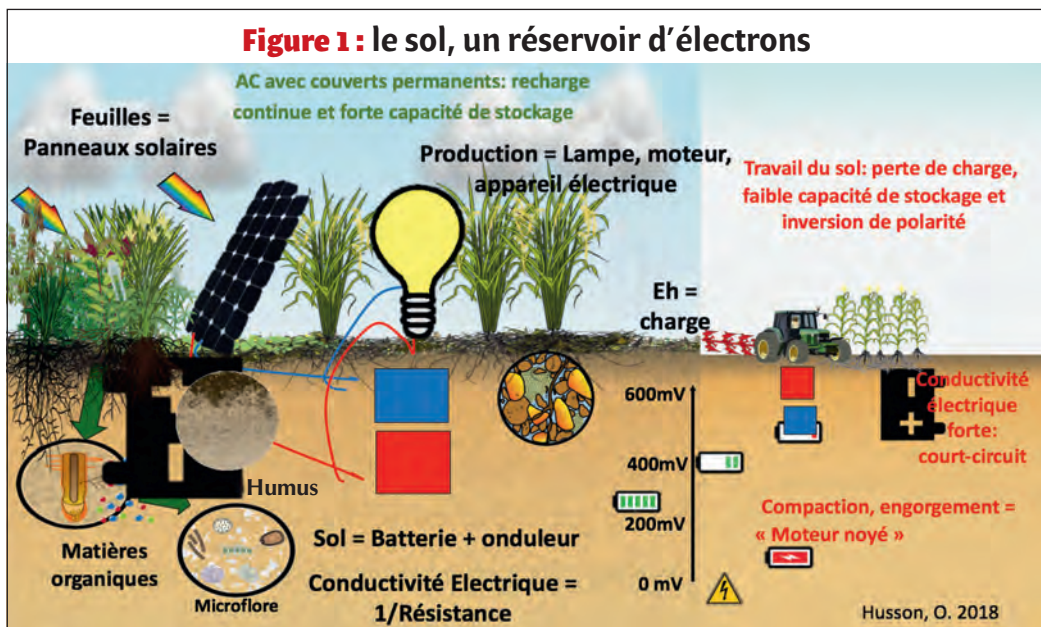
## LE POTENTIEL REDOX

# « LA VIE EST UN PETIT COURANT ÉLECTRIQUE ALIMENTÉ PAR LE SOLEIL »

Alors que le semis direct sous couvert végétal se développe de plus en plus, certains s'engagent sur des voies plus complexes pour essayer d'expliquer le pourquoi du comment. Le potentiel redox (ou potentiel d'oxydation-réduction) est une de ces voies. Alors que le sujet était assez confidentiel, il intéresse aujourd'hui de plus en plus d'agriculteurs à la recherche d'explications par rapport à des systèmes qui sont encore en transition. Pourquoi et comment le potentiel d'oxydo-réduction peut-il nous être utile ? Que doit-on faire pour avoir un sol en bon état d'oxydo-réduction ? Pourquoi est-ce que cela paraît compliqué ?

À l'image des réactions acido-basiques qui correspondent à des échanges de protons, les réactions d'oxydo-réduction correspondent à des échanges d'électrons. Elles se font entre un élément oxydant qui va gagner des électrons et un réducteur qui va donner ses électrons.

Plus un système est oxydé/oxydant, plus il est apte à capter des électrons et plus son potentiel d'oxydo-réduction est élevé, mais moins il a d'énergie. Plus il est réduit/réducteur, plus il a tendance à céder des électrons, plus son potentiel redox est bas et plus il a d'énergie. Ainsi, un sol à potentiel redox élevé manque d'électrons. On peut mesurer, avec des électrodes et un volt-mètre, un potentiel d'oxydation-réduction (en abrégé « potentiel redox », noté Eh et exprimé en mV) ; grandeur thermodynamique qui mesure le pouvoir oxydant ou réducteur d'un système redox. On peut ainsi voir le système sol/micro-organismes/plantes comme un système électrique, le sol et ses micro-organismes jouant le rôle de la batterie, un réservoir d'électrons (figure 1). Le potentiel redox est alors un indicateur du niveau de charge de la batterie.



### D'où viennent les électrons ?

Albert Szent Györgyi, prix Nobel de physiologie hongrois qui a découvert la vitamine C, disait : « *La vie est un petit courant électrique alimenté par le soleil* ». Effectivement, notre source d'énergie, indirectement, est bien le soleil ou l'énergie lumineuse ! La photosynthèse, qui est une réduction du CO<sub>2</sub> de l'air en sucres, est la réduction primaire, à l'origine de toute l'énergie sur terre. Elle transforme, grâce à la chlorophylle au sein des chloro-

plastes, l'énergie lumineuse des photons en énergie chimique stockée dans les sucres.

Le principe de la photosynthèse est donc de capter l'énergie lumineuse des photons et de la transmettre, via des électrons chargés de cette énergie, à une chaîne d'accepteurs d'électrons. En réalité, la « centrale énergétique » de la cellule, la mitochondrie, va utiliser cette énergie pour la croissance et le métabolisme de la plante.

Ainsi, les plantes jouent le rôle de panneaux solaires qui « rechargent » le sol en électrons (elles « rechargent les batteries »). Cela se fait soit par les racines (exsudation racinaire), soit par les apports en surface et dans le sol quand elles se décomposent. Les électrons sont stockés dans les matières organiques, mortes (humus) ou vivantes (micro-organismes et racines) et utilisés pour la croissance des plantes et des micro-organismes. Dans un sol « naturel », la photosynthèse est omniprésente puisque les végétaux, que ce soit des plantes herbacées ou

des arbres, sont actifs durant presque toute l'année, selon les écosystèmes. Les batteries sont rechargées régulièrement, par les apports en surface qui maintiennent un gradient d'électrons, avec un sol réduit en surface et plus oxydé dans l'horizon inférieur. Cette dynamique et ce gradient d'électrons sont retrouvés dans des systèmes en semis direct sous couverture végétale permanente.

L'agriculture conventionnelle perturbe fortement cet équilibre. D'une part, l'absence de plantes vivantes, pendant des périodes plus ou moins longues, prive le système de photosynthèse et donc d'entrée d'électrons. De plus, l'absence de protection végétale, vivante ou morte, expose le sol aux rayons UV du soleil qui interagissent avec le fer pour produire des éléments fortement oxydants. Il faut ajouter à ce panel, le travail mécanique du sol qui perturbe les flux d'électrons dans le profil. Enfin, des études récentes ont montré que le retournement conduit à une inversion de gra-

**ROLOFAC**

3 versions Ø580mm, 740mm, 830mm  
Lames hélicoïdales biseautées ou non  
Poids : 300kg à 680kg au mètre (sans lestage)  
Largeur : de 1m à 7m

[www.gregoireagri.com](http://www.gregoireagri.com)

Tel : 02 51 81 56 61 & 06 71 20 76 02  
44390 SAFFRE [gregoireagri@free.fr](mailto:gregoireagri@free.fr)

dient, déplaçant les électrons accumulés naturellement en surface dans l'horizon inférieur. On retourne ainsi la « polarité » de la batterie (figure 1), créant une force électrique qui pourrait avoir un impact important sur les mouvements d'ions, comme les bases ( $K^+$ ,  $Na^+$ , etc.) avec risque d'acidification de surface.

### Qu'est-ce qu'un bon « environnement redox » pour les plantes ?

Les études récentes en physiologie végétale montrent que des signaux redox sont à la base de tous les processus de régulation du métabolisme et du développement des plantes. Le rôle de ces signaux semble si universel qu'on ne sait plus dire quels processus métaboliques ne seraient pas régulés par l'oxydo-réduction. Physiologiquement, tous les êtres vivants se développent à un niveau pH-Eh spécifique, qu'ils doivent impérativement maintenir au niveau des cellules et en particulier au niveau des mitochondries. Pour maintenir cet équilibre pH-Eh dans les cellules, les plantes vont avoir recours à des tampons chimiques à court terme, à l'activation de gènes pour la formation de protéines à moyen terme et elles vont « évacuer » les produits très oxydés/acides dans les parois pour préserver les cellules. Mais elles vont aussi chercher à contrôler le milieu extérieur, au niveau de la rhizosphère, en exsudant des composés qui vont modifier pH et Eh et activer/nourrir la microflore qui contribue également à corriger ce milieu extérieur. Ainsi les racines des plantes vont toujours cher-



L'analogie avec un circuit électrique révèle également l'intérêt d'étudier non seulement les stocks de carbone (charge de la batterie), mais aussi le turn-over: la batterie peut être faiblement chargée mais le circuit fonctionne très bien si les « panneaux solaires » alimentent en continu un système qui produit fortement. C'est l'exemple de sols peu organiques, avec couverts permanents et forte restitution de biomasse. Inversement, la batterie peut être chargée sans que le système ne produise nécessairement bien: c'est le cas de sols en altitude ou climats froids, dans lesquels la matière organique évolue peu (la batterie reste bien chargée car le système produit peu). On comprend aussi différemment l'importance du stock de matières organiques, qui correspond à la capacité de la batterie. Il sera plus facile de faire fonctionner un système avec une batterie de forte capacité, qu'avec une capacité de stockage limitée qui ne permettra pas les mêmes irrégularités de recharge.

cher à maintenir un environnement proche de la neutralité acide/base et électrique (légèrement acide et réduit). Quand l'environnement est trop réduit (rizières, sols hydromorphes, sols engorgés, sols compactés, tourbières, etc.), seules les plantes capables de transporter de l'oxygène vers les racines à travers d'organes spéciaux, les aérénchymes, et ainsi de réoxygéner la rhizosphère pourront survivre. C'est ce que fait par exemple le riz dans les rizières, un milieu au potentiel redox très bas, qui manque d'oxygène. On peut comparer ces situations à un moteur « noyé », où l'énergie de l'essence ne peut pas être utilisée par manque d'oxygène pour la combustion du moteur. Dans les conditions pluviales, le problème est le plus souvent inverse, et d'autant plus marqué que le sol est dégradé et à faible

taux de matières organiques. Le sol oxydé manque d'électrons, la batterie est vide, et la plante va devoir le « recharger » par les racines. Elle transporte pour cela des produits de la photosynthèse au niveau des racines pour les relarguer et ainsi « corriger » son environnement, avec l'aide des micro-organismes. Mais cela a un coût énergétique important, et se fait au détriment de la croissance, ce qui limite sa production de feuilles et limite d'autant sa capacité de production photosynthétique, et donc de réduction. On entre dans un cercle vicieux: moins il y a d'électrons dans le sol, plus la plante doit en relarguer pour fonctionner, mais moins elle produit de feuilles et moins elle sera capable de relarguer des électrons dans le sol... À moyen/long terme, les retours de biomasse au sol diminuent et cette biomasse est rapidement oxydée

Quand nous cherchons à favoriser les semis clairs afin d'obtenir une végétation plus aérée pour limiter le développement des maladies, il s'agit d'une idée reçue malgré un constat juste... ce n'est pas le vent qui passe entre les feuilles qui va limiter les maladies: avec une réduction de densité de semis, les plantes reçoivent toutes plus de lumière, ce qui favorise la photosynthèse à tous les niveaux du feuillage, donc des surfaces « réduites », chargées en électrons, qui vont limiter le développement des maladies. Question: où se développent les maladies? Principalement sur les feuilles du bas. Ce sont des parties du feuillage qui sont le plus à l'ombre, donc peu de photosynthèse, donc peu d'électrons à disposition, donc des surfaces avec des terminaux d'oxydation qui vont favoriser le développement des champignons pathogènes.

(minéralisation rapide dans un sol oxydé), ce qui amplifie la tendance à l'oxydation du sol. Ce cercle vicieux est également amplifié par le fait que les conditions pH-Eh du sol vont déterminer les formes des différents éléments. La solubilité et l'absorption des éléments nutritifs et des éléments traces (« métaux lourds ») va ainsi être modifiée, entraînant risques de carences et de toxicités, qui conduisent à une baisse de la photosynthèse et donc de la capacité de réduction du milieu par la plante. De plus, sur un sol oxydé, l'azote se trouvera essentiellement sous sa forme oxydée (et très mobile) le nitrate ( $NO_3^-$ ) alors qu'en milieu réduit, l'azote sera essentiellement sous sa forme réduite d'ammonium ( $NH_4^+$ ) ou sous forme organique. Des conditions de sol oxydé entraînent, d'une part, un risque de pertes par lessivage et pollution des nappes, et, d'autre part, une dépense énergétique supplémentaire pour la plante



# WEAVING

MACHINERY

## THE GROWING BUSINESS

### La version Anglaise du disque incliné

- Très faible perturbation du sol
- Pas de paille au contact de la graine
- Sillon toujours bien refermé

Eric De Wulf (+33) 03.23.54.72.13 • 06.07.06.63.78 • france@weavingmachinery.net

Marin De Wulf 06.31.73.97.04 • m.dewulf@weavingmachinery.net

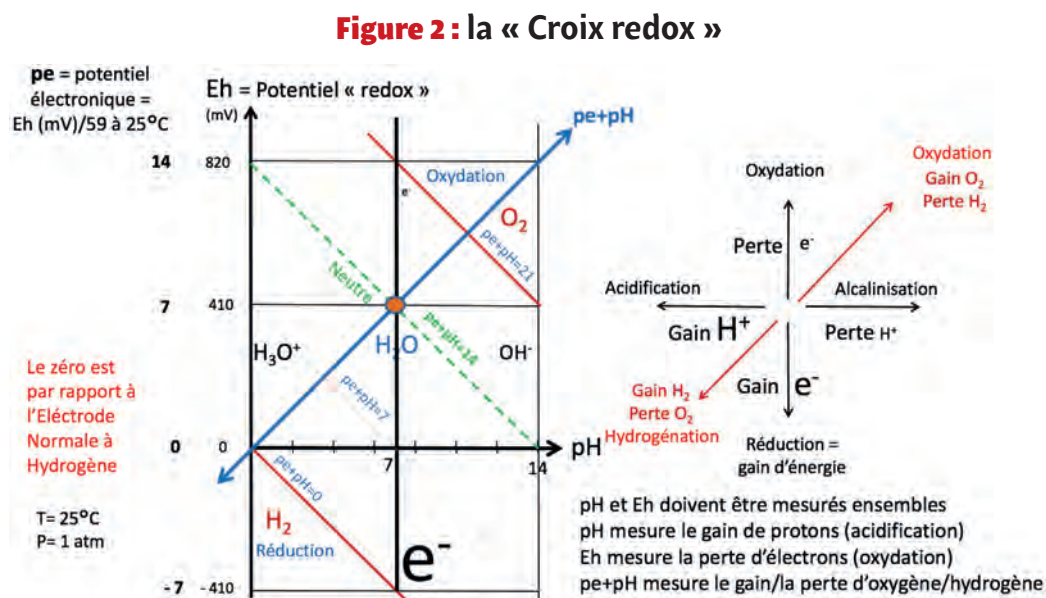
www.weavingmachinery.net

qui, absorbant de l'azote oxydé devra le réduire à l'intérieur de son système pour fabriquer les acides aminés nécessaires à la formation des protéines. La pire des situations est sans doute celle de sols dégradés, à faible taux de matières organiques, faible activité biologique et mauvaise structure (compactés, peu drainants), qui font que les conditions pour les plantes vont passer en quelques jours de très fortement réduites et asphyxiantes, après engorgement, à très fortement oxydées, après assèchement. Il leur est très difficile de maintenir leur équilibre redox dans de telles conditions.

## Conséquences sur la santé des plantes

Des travaux récents en physiologie et pathologie permettent de confirmer et de fournir des explications à des travaux plus anciens des pionniers de la bioélectronique (Louis-Claude Vincent, Jeanne Rousseau, etc.) qui proposaient de retenir comme indicateurs de santé trois paramètres: le pH, le rH<sub>2</sub> (qui correspond au niveau réel d'oxydation, en fonction du pH, cf. encadré) et la résistivité (r<sub>0</sub>, inverse de la conductivité). Ils avançaient il y a déjà 70 ans que les divers pathogènes ne se développaient que si le « terrain » (pH-rH<sub>2</sub> et r<sub>0</sub>) leur était favorable, et identifiaient des grands secteurs sur le diagramme pH-rH<sub>2</sub> favorables ou non aux différents types de pathogènes, les champignons se développant en milieu acide-oxydé, les virus en milieu basique-oxydé, les bactéries pathogènes en milieu basique-réduit, etc.

On sait maintenant qu'un virus comme la panachure jaune du riz à besoin d'un pH élevé pour se « gonfler » et sortir son ARN, et d'un Eh élevé pour contourner les défenses de la plante. Les champignons eux « respirent », en l'absence d'oxygène libre dans les cellules, grâce aux



Pour simplifier et bien comprendre, il suffit de représenter le pH et le Eh sur une « croix », avec le pH sur un axe horizontal et le Eh sur un axe vertical (figure 2). Pour conserver des échelles équivalentes sur les deux axes (logarithmiques), on peut calculer le potentiel électronique (pe), simplement en divisant le potentiel redox Eh (en mV) par 59 (à 25 °C). L'eau n'est stable que dans certaines limites Eh-pH indiquées par les deux lignes rouges sur la figure. La neutralité électrique correspond à la ligne verte, passant par pe = 7 (soit Eh = 410 mV) à pH = 7. La partie supérieure de cette figure correspond à une faible énergie (peu d'électrons disponibles), la partie inférieure à une forte énergie (nombreux électrons disponibles). La partie gauche correspond à de l'eau ayant gagné des protons (H<sub>2</sub>O + H<sup>+</sup> = H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>), la partie de droite à de l'eau ayant perdu des protons (H<sub>2</sub>O - H<sup>+</sup> = OH<sup>-</sup>). Comme oxydation et acidification sont reliées, selon une pente d'une unité pH pour une unité pe (ligne verte), il est plus judicieux d'estimer l'état d'oxydation par l'écart par rapport à cette ligne de neutralité électrique, qui peut se lire par le calcul de pe+pH (ligne bleue), qui correspond à la moitié de la notion de rH<sub>2</sub> utilisée en bio-électronique de LC Vincent. La neutralité électrique (ligne verte) correspond ainsi à pe+pH = 14 (rH<sub>2</sub> = 28).

terminaux d'oxydation utilisés comme accepteurs d'électrons. Ils se développent d'abord dans les parois, là où les plantes en manque d'électrons ont « évacué » les produits très oxydés, et uniquement sur des plantes trop oxydées.

Ainsi, le gradient et la dynamique « redox » dans la plante correspondent aux points et aux périodes d'entrée des différents pathogènes dans la plante. L'acidification et l'oxydation liées au vieillissement expliqueraient ainsi le processus d'immunité acquise et le fait que les plants âgés soient peu sensibles aux bactéries. Inversement, la sensibilité aux champignons augmente avec l'âge. La colonisation se fait par les parois en premier lieu, avant que le champignon ne pénètre dans les cellules, et on observe le plus fort développement des champignons sur les

## Pourquoi ça semble si compliqué ?

La notion de potentiel redox est souvent confuse, du fait de plusieurs facteurs.

- La charge négative de l'électron fait qu'un potentiel redox élevé correspond à une faible énergie. Inversement, les bas niveaux de potentiel redox correspondent à une haute énergie.
- Le potentiel redox (abrégé en Eh) correspond à une différence de potentiel (mesurée en Volts ou plus souvent en milli-Volts) par rapport à l'électrode normale à hydrogène (ENH). Les mesures se font avec un autre type d'électrode de référence, plus pratique d'usage mais qui ne correspond pas au niveau de l'ENH. Il faut donc corriger la mesure faite sur le terrain pour avoir la vraie valeur du potentiel redox (Eh), et cela en fonction de la température. Cette correction n'est pas toujours appliquée, et il n'est pas toujours indiqué si la correction a été faite ou pas (par l'appareil lui-même ou manuellement), ce qui engendre de la confusion dans les études sur le « redox ».
- Les mesures peuvent être faussées par les champs électromagnétiques, ce qui demande des précautions particulières pour s'assurer d'avoir des mesures correctes (choix du matériel et surtout de l'emplacement pour les mesures).
- Initialement perçue comme un gain d'oxygène ou une perte d'hydrogène, l'oxydation a finalement été considérée comme une perte d'électrons, et inversement, la réduction (gain d'hydrogène ou perte d'oxygène) comme un gain d'électrons. Mais le terme oxydation a été maintenu, ce qui engendre une ambiguïté.
- Si la neutralité acide-base correspond à un pH de 7 (sur une échelle de 0 à 14), le fait que l'eau comporte 2 atomes d'hydrogène pour un atome d'oxygène fait que la neutralité électrique ne se trouve pas à « mi-chemin » entre le domaine de stabilité de l'hydrogène et celui de l'oxygène, mais aux deux tiers, soit à Eh = 410 mV à 25 °C.
- Potentiel redox et pH ne sont pas indépendants. De l'eau qui s'oxyde (qui perd des électrons) va produire de l'oxygène (O<sub>2</sub>) et des protons (H<sup>+</sup>) et donc s'acidifier. Inversement, de l'eau qui gagne des électrons (réduction) va produire de l'hydrogène (H<sub>2</sub>) et des OH<sup>-</sup> et donc s'alcalinise et voit son pH monter. pH et Eh n'ont donc de sens que quand ils sont mesurés ensemble.

SOURCE: O. HUSSON

Le sol de demain se prépare aujourd'hui

Tél. 06.72.07.08.50  
www.rolofaca.fr

GERBER - 94 Route du Vin - 67 680 NOTHALTEN

vieilles feuilles, acides et oxydées. On comprend mieux aussi que tous les stress qui vont faire baisser la photosynthèse (froid, ciel couvert, ombrage, carences, etc.) vont conduire à une oxydation de la plante et ainsi favoriser les pathogènes de type virus et champignons.

Face à ce développement de pathogènes, les plantes, n'ayant pas l'énergie suffisante pour les contrôler par réduction, vont avoir recours à une oxydation forte (concentration de produits hyperoxydés comme l'eau oxygénée autour du champignon) pour les contrôler par suroxydation (en se nécrosant localement pour contenir le pathogène). Les fongicides aident ainsi la plante à passer d'un état oxydé (milieu qui favorise le développement des champignons) à un état « suroxydé », fatal aux champignons.

Mais n'oublions pas que la plante va chercher à revenir à son état d'équilibre naturel : l'état réduit. En passant de l'« hyperoxydé »

à son état d'équilibre « réduit », elle va une nouvelle fois passer par cette étape « oxydée », favorable à un autre développement de champignons. Une nouvelle application de fongicide sera nécessaire, etc. Il semblerait que les insectes soient également sensibles à ces déséquilibres redox, même si les mécanismes sont moins bien compris.

Cette perspective « redox » permet ainsi d'envisager une gestion complémentaire et agro-écologique des bioagresseurs. L'idée ici n'est pas de les contrôler mais plutôt de maintenir la plante dans un état d'équilibre (légèrement acide et réduit), qui leur est défavorable.

Nous avons donc tout intérêt à avoir des sols réduits, chargés en électrons et en énergie, afin d'avoir des végétaux qui soient « réduits », et que ces derniers, consommés par des animaux ou des humains, puissent continuer à transférer des électrons et de l'énergie. Pour cela, il faut reconstruire des sols équilibrés (cf.

encadré) : si la plante avait en permanence les racines dans un milieu légèrement réduit, si elle n'avait pas à transférer son énergie issue de la lumière dans le sol, elle pourrait garder ses électrons dans les feuilles et serait entièrement « réduite » au niveau foliaire, ce qui éviterait d'avoir à lutter contre des maladies qui viennent en conséquence d'un

état oxydé de la plante.

Pendant la période nécessaire à « reconstruire » les sols, on peut aider les plantes à se maintenir dans des conditions d'équilibre défavorables aux bioagresseurs, avec des pulvérisations foliaires préventives de produits anti-oxydants (cf. encadré).

Sarah SINGLA, avec la collaboration d'Olivier HUSSON (Cirad)

### Un peu d'électricité de base : la conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique des sols est un paramètre largement utilisé en agriculture de précision pour caractériser les sols (compaction, texture, CEC, humidité, etc.) et ajuster les pratiques (apports d'engrais, irrigation, etc.), mais généralement délaissée par l'agriculture de conservation. L'analogie des systèmes sols/micro-organismes/plantes avec un circuit électrique lui donne tout son sens. Un circuit électrique ne peut pas se comprendre uniquement en étudiant la tension : il faut également prendre en compte sa résistance. La résistivité est l'inverse de la conductivité électrique ( $R = 1/CE$ ). Cela permet de calculer une intensité et une puissance électrique du système, cette dernière correspondant à sa capacité de production dans le cas du système sol/plantes. On comprend ainsi que la perte de tension (élévation du redox par perte de matières organiques des sols) du système a été « compensée » par une augmentation de la conductivité électrique (baisse de la résistance), par apport d'engrais pour maintenir la puissance de fonctionnement du système (la productivité). Mais en augmentant la conductivité électrique du sol, on « vide » plus rapidement la batterie (matières organiques du sol) sauf si on dispose de suffisamment de « panneaux solaires » (feuilles/photosynthèse et restitution au sol).

### Comment développer un sol équilibré pour des plantes saines ?

Le niveau Eh-pH d'un sol, et ses fluctuations, sont avant tout liés à :

- la matière organique qui est le réservoir d'électrons. Elle abaisse et tamponne les variations du Eh et ramène le pH vers le neutre/légèrement acide ;
- l'activité biologique. Les microorganismes vont consommer l'oxygène et ainsi réduire le milieu ;
- l'argile. Le fer dans les feuillettes va donner ou accepter des électrons, ce qui tamponne les variations ;
- avant toute chose, une structure stable, qui doit à la fois permettre le stockage d'eau, et la circulation d'oxygène pour éviter asphyxie ou suroxydation par assèchement.

Pour faire simple, et ne pas partir dans des explications qui engendrent plus de questionnements que de réponses, toutes les techniques agricoles qui favorisent le non-retournement du sol, la couverture végétale vivante et la restitution de fortes biomasses au sol favorisent le développement d'une structure stable et de conditions d'oxydo-réduction équilibrées et ainsi la production d'aliments sains, riches en antioxydants et pleins d'énergie...

À l'inverse, une faible couverture du sol, un sol nu et travaillé, une faible restitution de biomasse, les brûlis, engendrent oxydation et fortes fluctuations, très néfastes aux plantes. La plupart des pesticides sont également oxydants, ainsi que de nombreux engrais chimiques.

### Vitamine C et produits antioxydants ?

La vitamine C ou les autres produits antioxydants sont des molécules qui vont agir en préventif uniquement. La vitamine C ou autre composé réduit va aider la plante à se maintenir dans un état réduit, et éviter qu'elle s'oxyde. Nous nous accordons à dire que ce genre de produit va simplement agir en tant que préventif, on va maintenir une plante à l'état réduit, mais en aucun cas elle ne pourra agir en tant que curatif. Au contraire, si le champignon est déjà développé, en appliquant ce type de produits on risque d'empêcher la plante de le contrôler par suroxydation... Analogie : nous prenons de la vitamine C en hiver pour lutter contre le rhume, mais si nous tombons malades, nous serons souvent obligés de passer par des traitements plus forts qui vont venir éradiquer la maladie...





TESTEZ. COMPAREZ. CHOISISSEZ !



Le choix d'un semoir de semis direct n'est pas simple !

Pour vous aider, notre objectif est simple : même jour - même champ que nos concurrents.

SLY a conçu une machine spéciale démo, rapide à déplacer.

DEMANDEZ UNE DÉMONSTRATION


slyfrance.com




05.53.40.32.95