

Potentiel REDOX, pH et lutte bio-logique

Définition du potentiel REDOX

- Le potentiel REDOX (noté Eh) représente l'énergie accumulée par les électrons: il correspond à une différence de potentiel (mesurée en Volts ou en millivolts) par rapport à l'électrode normale à hydrogène (ENH).
- En pratique, les mesures se font avec d'autres types d'électrodes de référence qui ne correspondent 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.
- En général il faut rajouter 210 mV pour avoir Eh mais cela dépend du type d'électrode que l'on a (par exemple, pour une électrode au mercure cela sera 245 mV). Il faut donc se renseigner auprès de son fournisseur sur le type d'électrode présente et la correction à rajouter pour obtenir Eh.
- Attention, plus il y a d'électrons, plus on accumule de l'énergie et plus le potentiel redox est faible (voir négatif). Moins il y a d'électrons, moins on accumule de l'énergie et plus le potentiel redox est élevé : cela est due à la charge négative de l'électron.
- De manière analogique, le pH mesure l'activité des protons chargés positivement tandis que le potentiel redox mesure l'activité des électrons chargés négativement.

La « Croix REDOX » ou relation Eh-pH

- Classiquement on explique beaucoup de phénomènes de la chimie des sols et de la physiologie végétale par le pH.
- On rajoute à l'axe du pH un axe Eh perpendiculaire à l'axe pH: l'eau (H_2O) est au centre.
- Sur l'axe du pH (figure 1) ou axe de « disponibilité des protons » :
 - de l'eau qui gagne des protons H^+ s'acidifie (production de H_3O^+)
 - De l'eau qui perd des protons s'alcalinise (production de OH^-)
- Sur l'axe Eh (figure 1) ou axe de « disponibilité des électrons » :
 - de l'eau qui gagne des électrons est réduite (réduction = gain d'énergie)
 - de l'eau qui perd des électrons est oxydé (oxydation = perte d'énergie)

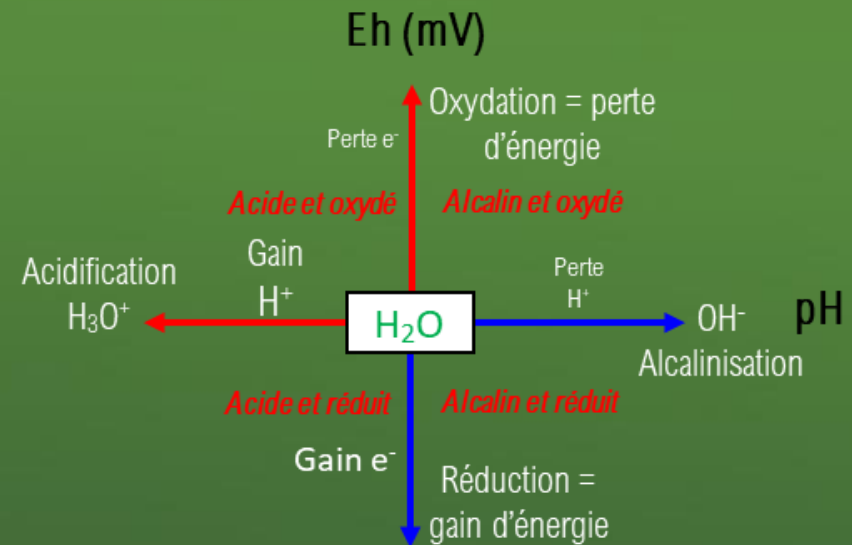
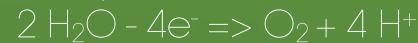


Figure 1: La "Croix Redox" (Husson, 2020).

La « Croix REDOX » ou relation Eh-pH

Potentiel redox et pH (Eh-pH) ne sont pas indépendants (figure 2)

- De l'eau qui est oxydée va perdre des électrons (oxydation), produire de l'oxygène (O₂) et des protons (H⁺) et donc s'acidifier (pH ↓): plus c'est oxydé, plus il y a acidification :



- De l'eau qui est réduite va gagner des électrons (réduction), produire de l'hydrogène (H₂) et des OH⁻ et donc s'alcaliniser (pH ↑): plus c'est réduit, plus il y a alcalinisation:



- Pour conserver des échelles équivalentes sur les deux axes logarithmiques, on calcule le potentiel électronique (pe), en divisant le potentiel REDOX Eh (en mV) par 59 (à 25 °C).

- La ligne en pointillé rouge (pe + pH = 21) et la ligne en pointillé bleu (pe + pH = 0) représentent les limites de la stabilité de l'eau en fonction de Eh et pH: sous la ligne bleue, l'eau est sous forme de H₂, au dessus de la ligne rouge l'eau est sous forme de O₂ (2 H₂O ⇌ 2 H₂ + O₂).

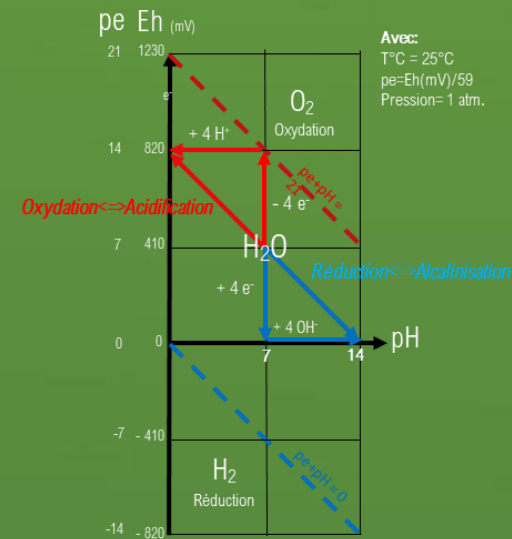


Figure 2: Croix rédox, les réactions acide/base et oxydation/réduction ne sont pas indépendantes (Husson, 2020).

La « Croix REDOX » ou relation Eh-pH

- La neutralité électrique correspond à la ligne verte ($pe + pH = 14$, figure 3), passant par $pe = 7$ (soit $Eh = 410$ mV) à $pH = 7$.
- La partie supérieure de $pe + pH = 14$ (ligne verte) correspond à une faible énergie (peu d'électrons disponibles), la partie inférieure de $pe + pH = 14$ à une forte énergie (nombreux électrons disponibles).
- La partie gauche correspond à de l'eau ayant gagné des protons ($H_2O + H^+ = H_3O^+$), la partie de droite à de l'eau ayant perdu des protons ($H_2O - H^+ = OH^-$).
- 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 noire)

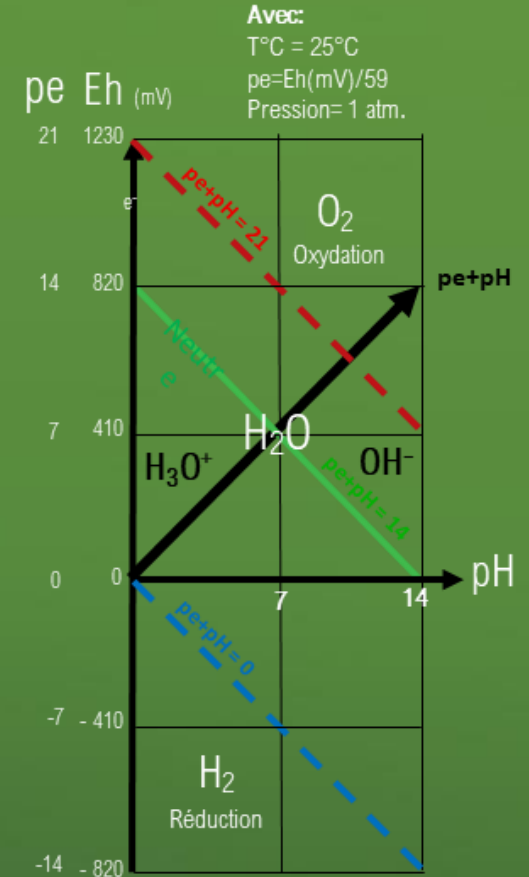


Figure 3: Croix rédox, comparaison de l'état d'oxydation de deux mesures Eh-pH entre elles (Husson, 2020).

La « Croix REDOX » ou relation Eh-pH

- On peut ainsi définir 4 classes différentes de sol (figure 4) par rapport à un sol idéal « neutre » (pH7; pe7):
 - Acide et oxydé,
 - Acide et réduit,
 - Basique et oxydé,
 - Basique et réduit.

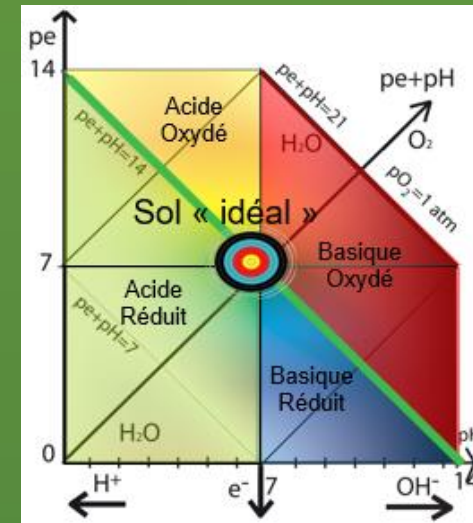


Figure 4: quatre zones différentes selon le sol « idéal » (Husson, 2020).

- Cependant les zones oxydé/réduit et acide/basique sont relatives (figure 5) par rapport à un niveau de fonctionnement optimal spécifique pour une plante (chaque plante a un niveau Eh-pH qui lui est optimal et qui est différent du niveau Eh-pH du sol idéal).

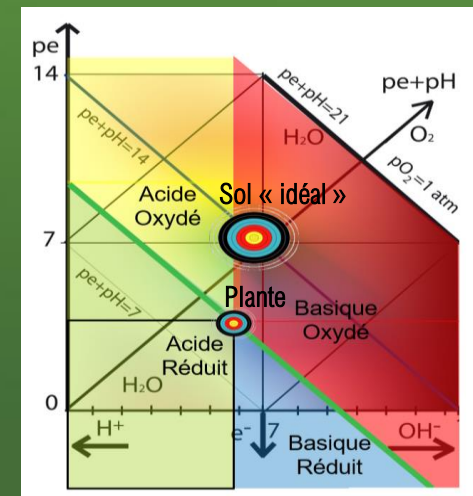


Figure 5: quatre nouvelles zones différentes selon le Eh-pH spécifique de la plante (Husson, 2020).

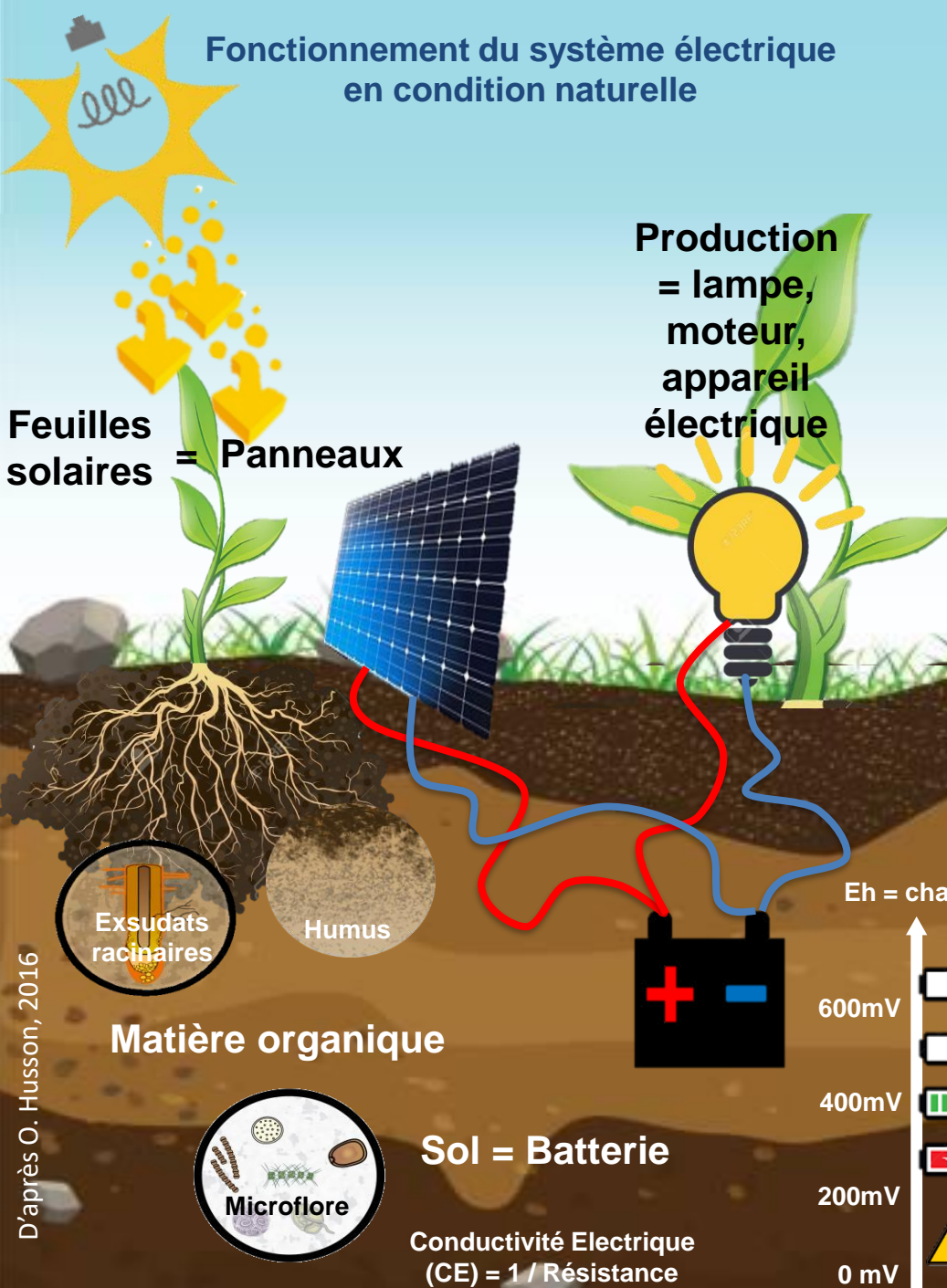
Le système Sol-Microorganismes-Plante : un système électrique

- On peut voir le système sol / microorganismes / plantes comme un système électrique (figure 6):
 - les feuilles des plantes jouent le rôle de panneaux solaires qui rechargent en électrons la batterie,
 - le sol et les microorganismes jouent le rôle de la batterie (réservoir d'électrons).
- Le potentiel rédox Eh est alors un indicateur du niveau de charge de la batterie.

En condition naturelle (figure 6)

- Les plantes rechargent le sol (la « batterie ») en électrons régulièrement grâce à la photosynthèse, à leurs exsudats racinaires, à la décomposition des racines dans le sol et par les apports en surface (feuilles mortes, plantes mortes, branches mortes, etc...).
- Les électrons sont stockés dans les matières organiques mortes (humus) ou vivantes (microorganismes et racines) et utilisés pour la croissance des plantes et des microorganismes.
- Ces apports en surface maintiennent un gradient d'électrons* avec un sol réduit riche en électrons en surface (pôle - de la pile) et un sol plus oxydé dans l'horizon inférieur (pôle + de la pile).

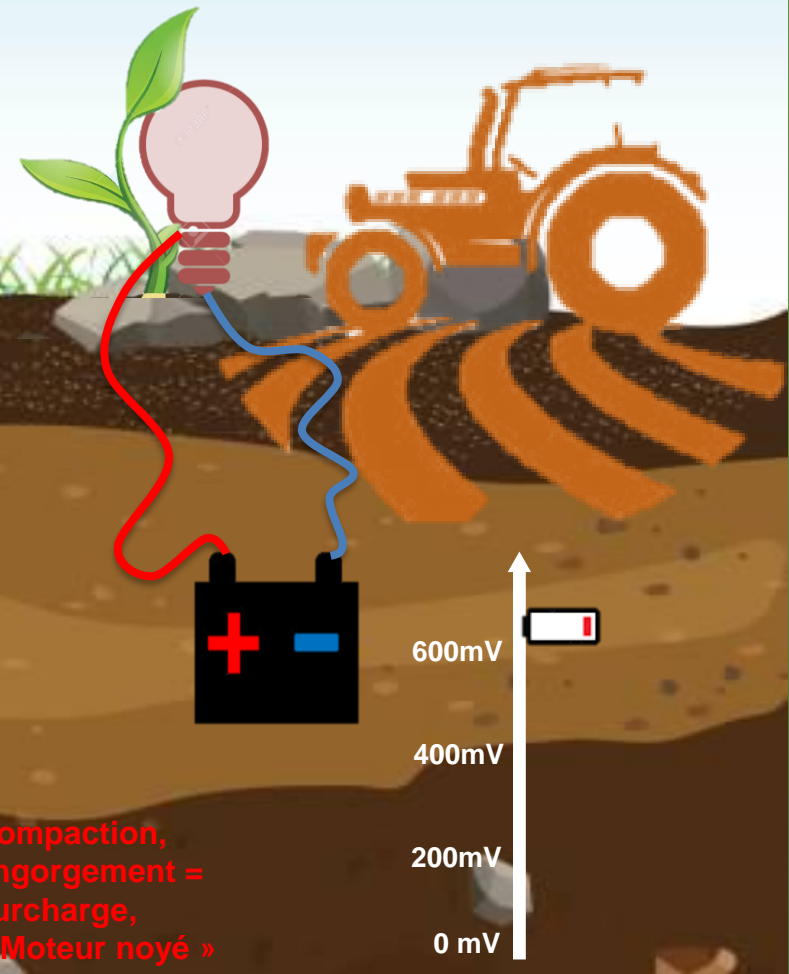
Fonctionnement du système électrique en condition naturelle



Fonctionnement du système électrique en agriculture conventionnelle

Travail du sol:

- ✓ perte de charge : la batterie n'est plus rechargée par les panneaux solaires (feuilles),
- ✓ faible capacité de stockage,
- ✓ inversion de polarité (retournement, labour),
- ✓ la conductivité électrique est forte (court-circuit) car on l'a augmentée (engrais minéraux, labour) pour compenser la baisse de tension (perte de MO).



La « Croix REDOX » ou relation Eh-pH

En agriculture conventionnelle (figure 6)

- L'absence de plantes vivantes et d'apport au sol pendant des périodes plus ou moins longues, prive le système de photosynthèse et donc d'entrée d'électrons (le sol, la « batterie », ne se recharge pas).
- A cause de l'absence d'une protection végétale vivante ou morte, un sol nu est exposé aux rayons UV du soleil qui interagissent avec le fer (réaction de Fenton, figure 7) pour produire des éléments fortement oxydants (l'anion superoxyde O_2^- et le radical hydroxyle $HO\cdot$) : ces éléments oxydants détruisent chimiquement la matière organique, et plus la matière organique d'un sol est faible plus cette réaction est importante.

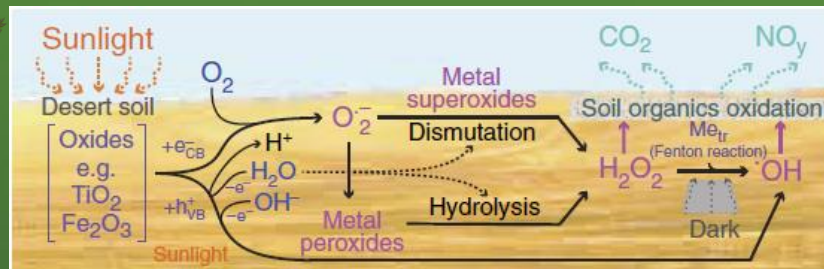
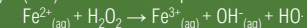


Figure 7: Mécanisme photochimique de l'action oxydante des sols (Georgiou et al., 2015).

Le rayonnement solaire des sols génère des électrons qui convertissent l' O_2 en O_2^- . Cet anion superoxyde, O_2^- , peut être initialement adsorbé à la surface des sols et stabilisé à long terme sous forme de superoxydes et de peroxydes métalliques.

Ceux-ci peuvent être convertis dans des conditions aqueuses en H_2O_2 , qui peut ensuite être converti en radical hydroxyle ($OH\cdot$) dans l'obscurité par la réaction de Fenton:



- Le retournement du sol conduit à une inversion de gradient, déplaçant les électrons accumulés naturellement en surface dans l'horizon inférieur. On retourne ainsi la « polarité » de la batterie, 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.

Relation entre Eh-pH et le sol

Eh-pH et matière organique du sol

- Eh-pH du sol impactent le devenir de la MO: Eh-pH régule la vitesse et l'intensité de la minéralisation et les processus d'humification (Chesworth, 2004; Macías et Arbestain, 2010; Reddy et al., 1986; Rusanov et Anilova, 2009):
 - ✓ La MO du sol est rapidement dégradée en conditions oxydantes et inversement.
- La matière organique labile (qui se minéralise rapidement) est un réservoir d'électrons (particulièrement de quinones). Cela réduit et tamponne le redox et favorise des pH neutres ou légèrement acides (Brady et al., 2010; Skyllberg et al., 2001).

Eh-pH et microorganismes (Rabotnova, 1963).

- Chaque microorganisme est adapté à des conditions Eh-pH spécifiques.
- Eh-pH du sol est un des principaux régulateurs des populations microbiennes.
- Les microorganismes ont une forte capacité à modifier Eh-pH de leur environnement (biofilms).
- La respiration consomme de l'O₂ et réduit le milieu.

Relation entre Eh-pH et le sol

Facteurs influant sur Eh-pH dans le sol :

- La teneur en argile, en fer (le fer dans les feuillets d'argile peut donner ou accepter un électron en interaction avec les microorganismes) et en soufre (Charlet et *al.*, 2007; Shelobolina, et *al.*, 2012).
- L'eau et l'air dans le sol (en sols acides, la submersion donne lieu à une rapide et forte baisse de l'Eh (anaérobie) et à une légère augmentation du pH vers la neutralité) d'où une très forte variation de Eh-pH dans le temps et l'espace.
D'une manière générale:
 - Plus un sol sera aéré, plus il sera oxydé,
 - Plus un sol sera compacté ou inondé, plus il sera réduit.
- La structure, l'activité biologique et la teneur en matière organique du sol.

Relation entre Eh-pH et les formes d'Azote dans le sol

- Sur un sol oxydé, l'azote se trouvera essentiellement sous sa forme oxydée (et très mobile) le nitrate (NO_3^-).
- Sur un sol réduit, l'azote sera essentiellement sous sa forme réduite d'ammonium (NH_4^+) ou sous forme organique (figure 8).

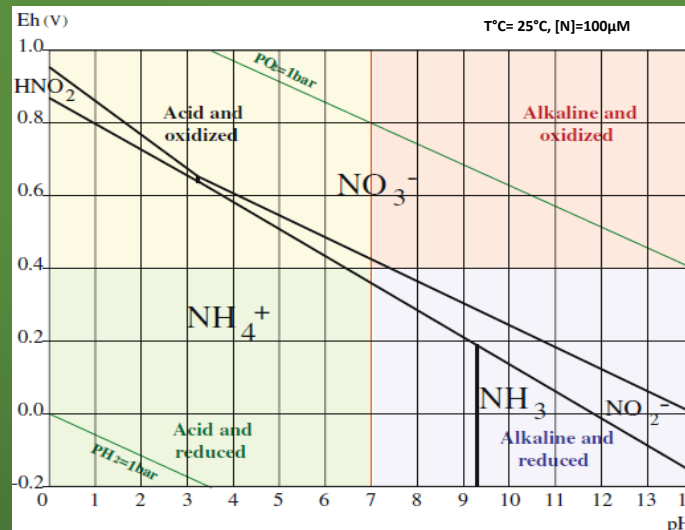


Figure 8: Diagramme de Pourbaix représentant les différentes formes de l'Azote dans une solution de 100 µM d'Azote à 25 °C en fonction de Eh (en Volt) et du pH (Husson, 2012).

- Des sol oxydés entraînent:
 - un risque de pertes des nitrates par lixiviation et donc de pollution des nappes phréatiques,
 - une dépense énergétique supplémentaire pour la plante car, à l'inverse de l'ammonium, le nitrate devra être réduit pour fabriquer les acides aminés nécessaires à la formation des protéines.

Relation entre Eh-pH et les autres minéraux du sol

- La solubilité des nutriments et des métaux lourds est liée à la fois à l'Eh et au pH (figure 9).
- Il existe une «gamme» Eh-pH optimale du sol pour la nutrition des plantes (favorable conditions, figure 9).
- Par exemple, il y a un risque de carence (figure 9):
 - en Fer, Manganèse et Phosphore à $pe + pH$ élevé (zone oxydée et alcalin),
 - en Molybdène à $pe + pH$ bas (zone réduite et acide).

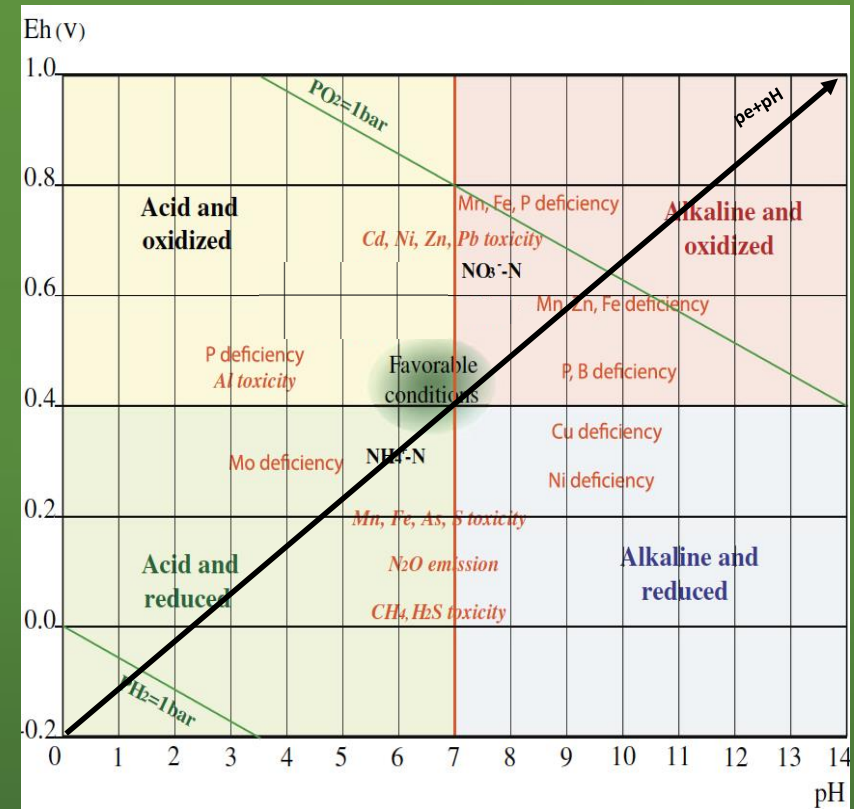


Figure 9: Disponibilité des éléments minéraux dans le sol pour la plante en fonction de Eh-pH (Husson, 2020).

Relation entre Eh-pH et le fonctionnement des plantes

- Le pH optimal pour la plupart des plantes cultivées se situe entre 6,5 et 7 et les conditions favorables à la croissance des plantes entre 5,5 et 8.
- Le potentiel d'oxydoréduction optimal est de l'ordre de 400 à 450 mV et les conditions favorables à la croissance des plantes entre 500 et 350 mV. En dessous de 350 mV, la croissance des plantes diminue rapidement.
- La photosynthèse est le meilleur moyen pour la plante de lutter contre l'oxydation : elle consiste à réduire le CO_2 de l'air grâce à l'énergie solaire.

Fonctionnement de la plante et signaux rédox

- Les signaux redox sont impliqués dans la régulation:
 - des enzymes, des pompes à protons et des canaux ioniques,
 - de l'absorption des éléments nutritifs et des régulateurs de croissance,
 - de la mort cellulaire programmée,
 - de l'ouverture des stomates,
 - des cycles phénologiques en interactions avec les hormones (dormance, germination, développement racinaire, développement reproductif, photopériodisme, etc...)
- Les signaux redox sont impliqués dans la perception de l'environnement (température, intensité lumineuse) et des stress abiotiques

Eh-pH (Dietz et Pfannschmidt, 2011; Ghezzi, 2005; Pfannschmidt, 2003; Huner et al., 1996; Wilson et al., 2006; Hell, 2017; Bailly et al., 2008)

Relation entre Eh-pH et le fonctionnement des plantes

Les plantes agissent sur le Eh-pH de la rhizosphère (Chaignon et al., 2002; DeLaune et al., 1998; Hinsinger et al., 2003) :

- Les plantes se comportent comme si elles évitaient les Eh-pH extrêmes.
- Lorsque le Eh-pH du sol ne convient pas à la plante elle est capable de modifier fortement le Eh-pH dans la rizosphère (figure 10) pour assurer l'homéostasie dans ses cellules grâce:
 - à la sécretion d'exudats racinaires (sucres, acides organiques, acides aminés, vitamines),
 - à la sélection de microorganismes spécifiques.
- Mais ce mécanisme est énergivore pour la plante (perte de 5 à 80 % du carbone photosynthétisé pour adapter le Eh-pH du sol à la plante) et se fait au détriment de sa croissance.

Figure 10: pH rhizosphérique (entre 5 et 5,5) le long des racines d'un épicéa de Norvège de 4 ans cultivé dans un sol de pH 4,5 (Marschner et al., 1986).

Le niveau redox de la plante dépend (Husson et al., 2018) :

- Du niveau Eh-pH du sol (Eh des plantes < Eh du sol),
- De l'organe et de sa position sur la plante
- De l'âge (vieillessement = acidification et oxydation),
- Du génotype (espèce et variété).

Relation entre Eh-pH et la santé des plantes

- Les plantes ne se feront pas nécessairement attaquer par les bioagresseurs: elles le seront quand elles seront déséquilibrées, en particulier sur le plan Eh-pH.
- Par les pratiques culturales et les systèmes de culture, on peut modifier ces conditions bio-physico-chimiques du sol et des plantes pour les rendre défavorables aux bioagresseurs : c'est une gestion agronomique des bioagresseurs ou une protection agroécologique des cultures (lutte Bio-Logique).

Eh-pH et champignons pathogènes (Davet, 1996; Benada, 1966):

- Les champignons pathogènes se développent en condition Eh-pH acide et oxydé (Eh élevé),
- La plupart des champignons pathogènes sont sensible à l'ammoniac.

Eh-pH et bactéries pathogènes (Patsoukis et Georgiou, 2007; Dyakov et al., 2007) :

- Les bactéries pathogènes se développent en condition Eh-pH alcalin et réduite (Eh bas),
- Les plantes acquièrent une immunité contre les bactéries pathogènes lorsqu'elles vieillissent (plus la plante vieillit, plus elle devient oxydé et acide).

Relation entre Eh-pH et la santé des plantes

Eh-pH et virus (Brugidou et al., 2002; Gillet et al., 2013) :

- Les virus se développent en condition Eh-pH alcalin et oxydé (Eh élevé).
- Par exemple, le virus de la panachure jaune du riz (RYMV) a besoin d'un pH élevé pour se « gonfler », sortir son ARN pour se multiplier et se déplacer dans la plante, et d'un Eh élevé pour contourner les défenses de la plante par oxydation/polymérisation de protéines.

Eh-pH et insectes (Kerchev et al., 2013; Goggin et al., 2010) :

- Des mécanismes d'oxydo-réduction sont impliqués dans les interactions entre plantes et insectes.
- Il existe des mécanismes de résistance des plantes contre les insectes par les antioxydants (phénols, vitamine C, etc...)

Relation entre Eh-pH et la santé des plantes

La carte des mondes Eh-pH (monde « rédox », figure 11)

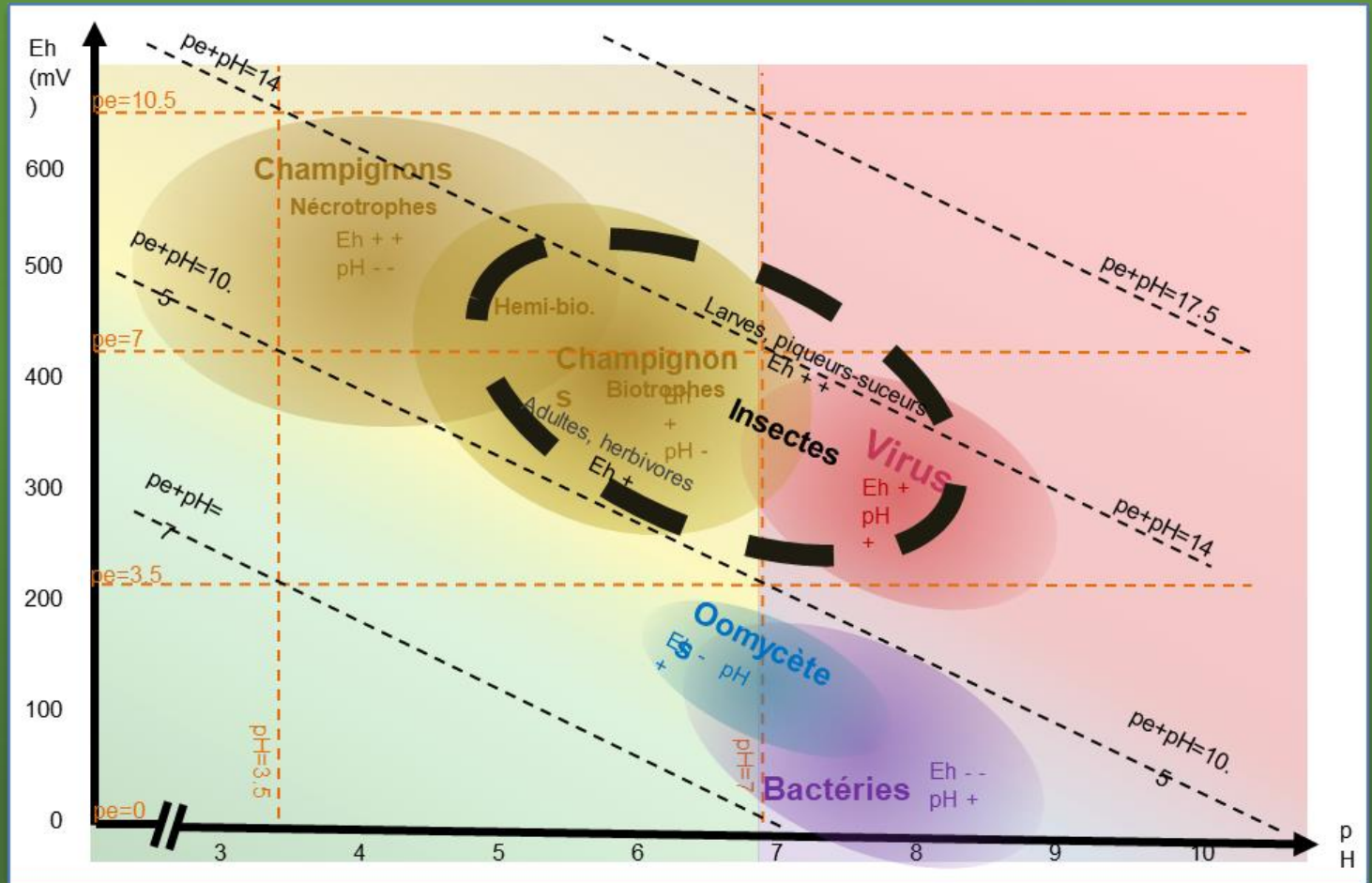


Figure 11: les différentes gammes Eh-pH de développement des principaux bioagresseurs: la carte des mondes rédox (Husson, 2020).

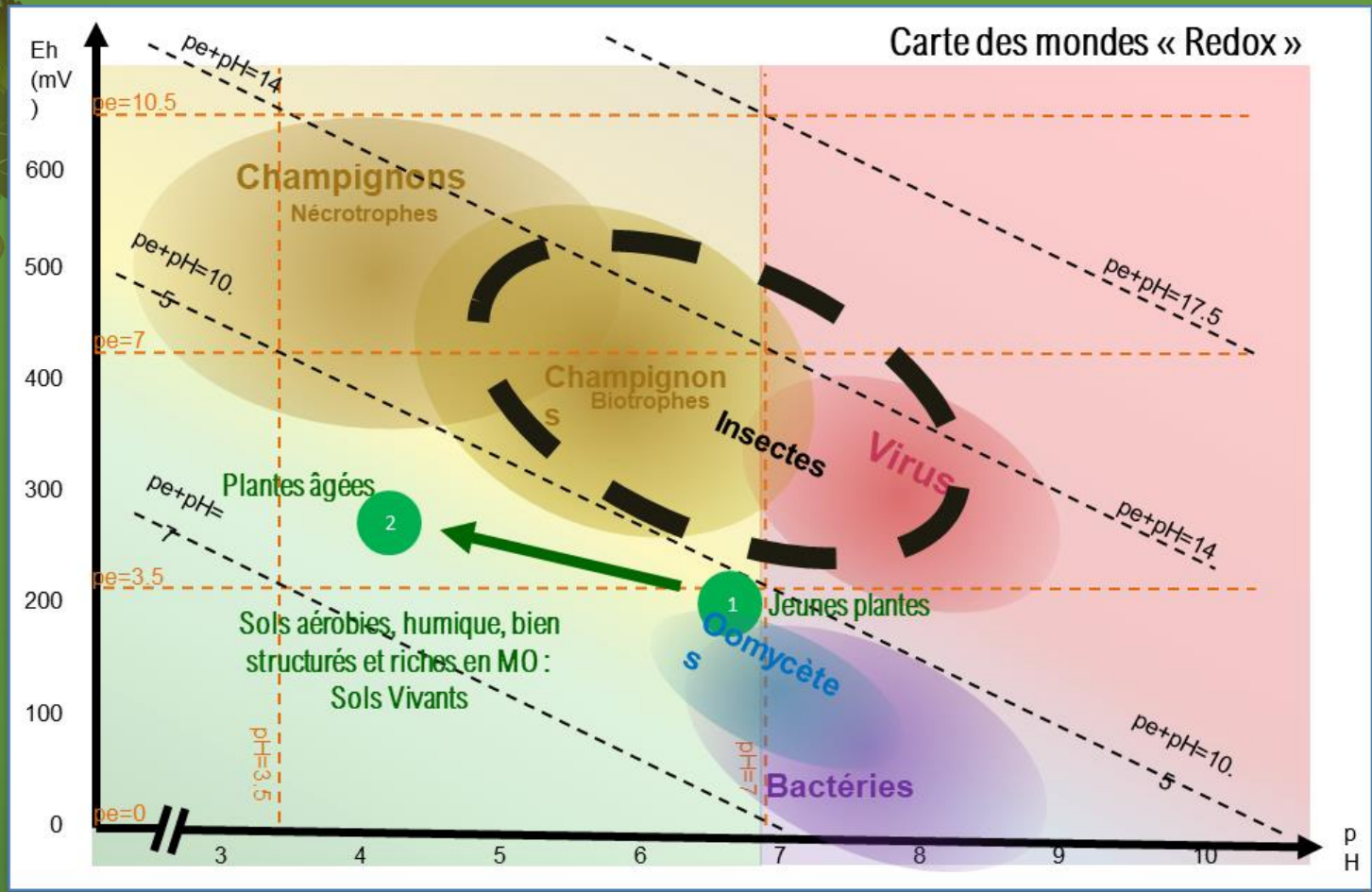


Figure 12: évolution du statut Eh-pH d'une plante au cours de son cycle de développement dans un sol vivant (Husson, 2020).

- De manière générale, les jeunes plantes sont réduites (activité photosynthétique intense) et ont un pH neutre (1, figure 12).
- En vieillissant elles deviennent acides et oxydées (2): c'est le cycle normal de développement d'une plante dans un sol aérobie, bien structuré riche en MO et en humus (sols vivants, légèrement acide et réduit que l'on appelle aussi des sols suppressifs des maladies).

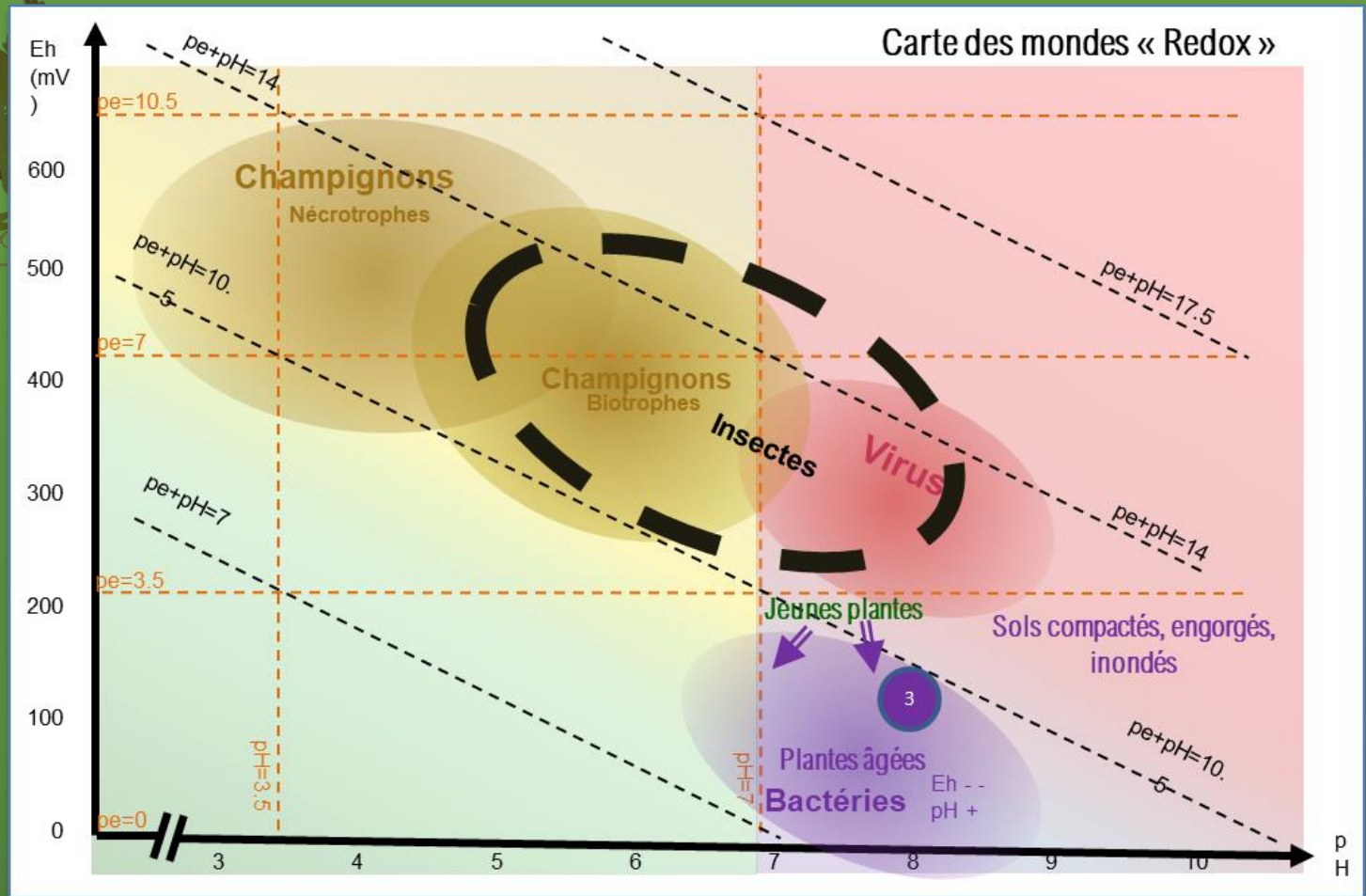


Figure 13: évolution des conditions Eh-pH d'une plante au cours de son cycle de développement dans un sol compactés, engorgés ou inondés (Husson, 2020).

➤ Si la plante se développe en début de cycle sur un sol compacté, engorgé ou inondé, les jeunes plantes évolueront vers des conditions Eh-pH favorables aux bioagresseurs de type bactéries pathogènes et/ou oomycètes (3, figure 13) principalement sur les jeunes feuilles les plus réduites (forte activité photosynthétique).

➤ Par exemple, pour la vigne c'est dans des conditions de forte pluie, d'engorgement, de zone basse, de compaction (conditions favorisant une réduction et une alcalinisation du sol, Cf figure 2) que vont se développer *Plasmopara viticola* (Oomycètes).

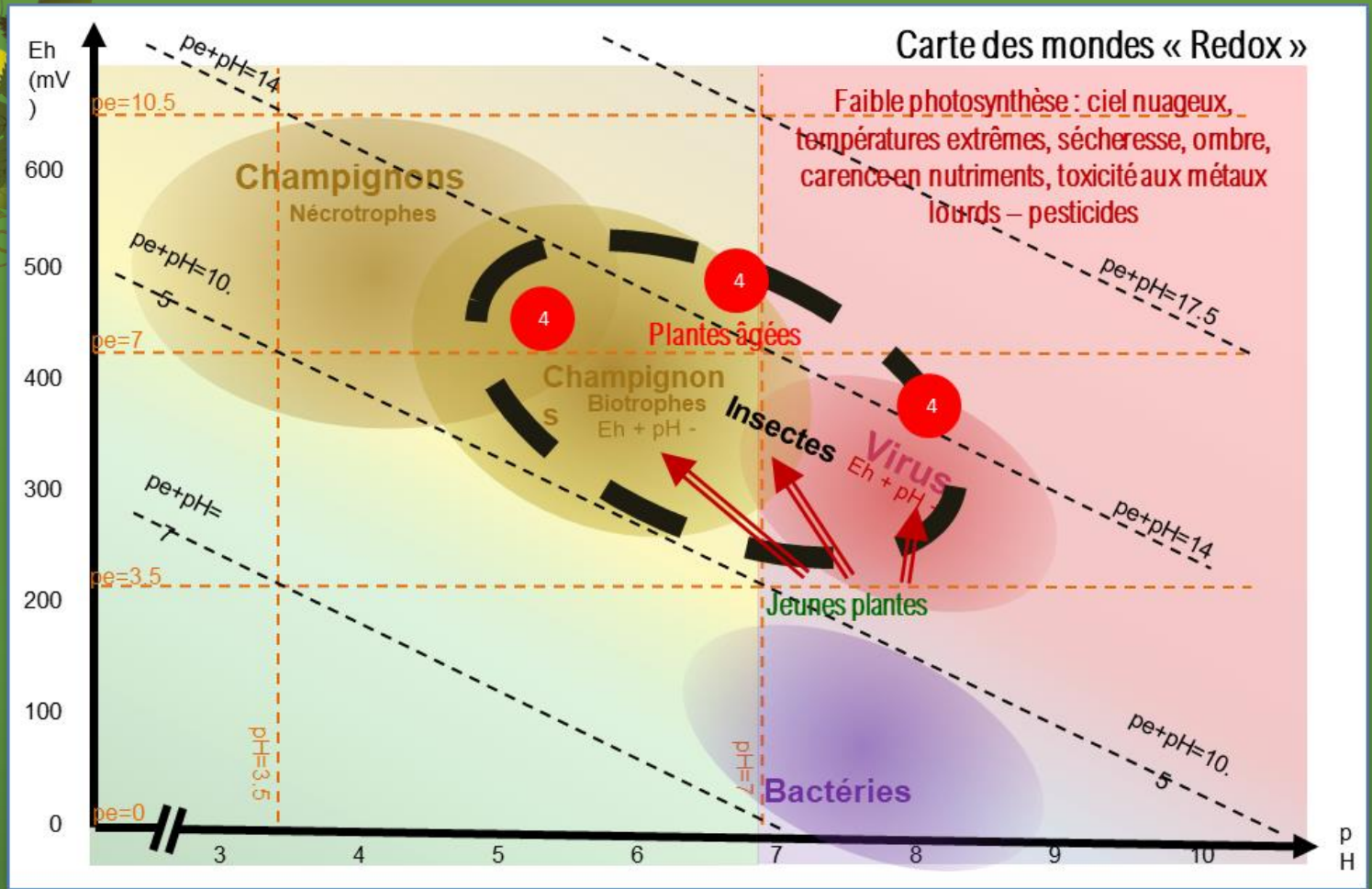


Figure 14: évolution des conditions Eh-pH d'une plante au cours de son cycle de développement dans des conditions pédoclimatiques favorisant une faible photosynthèse (Husson, 2020).

- Si on a une baisse de la photosynthèse liée à des conditions climatiques (ciel nuageux, températures extrêmes, sécheresse, stress hydriques, etc...), des carences en nutriments (niveau de rédox dans le sol induisant des carences comme Mn, Fe, P; Cf figure 9) ou une toxicité aux métaux lourds/pesticides, les jeunes plantes évolueront vers des conditions Eh-pH favorables aux bioagresseurs de type insectes, virus et/ou champignons (4, figure 14).

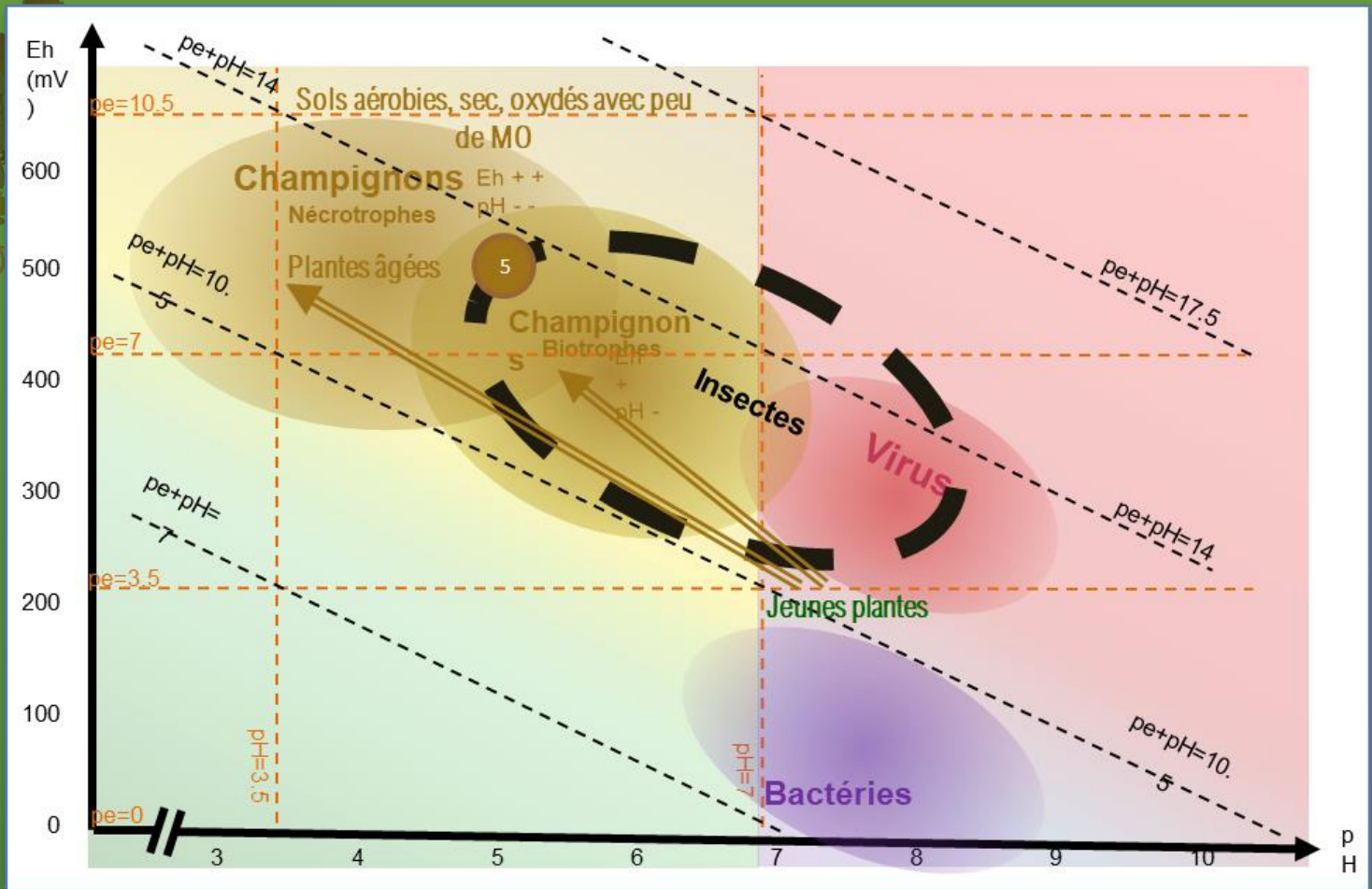


Figure 15: évolution des conditions Eh-pH d'une plante au cours de son cycle de développement dans un sol aérobie, sec et oxydé avec peu de MO (Husson, 2020).

- Si en début de cycle les jeunes plantes se développent sur des sols aérobie, secs, oxydés avec peu de matières organiques, elles évolueront vers des conditions Eh-pH favorables aux bioagresseurs de type champignons et insectes (5 , figure 15).

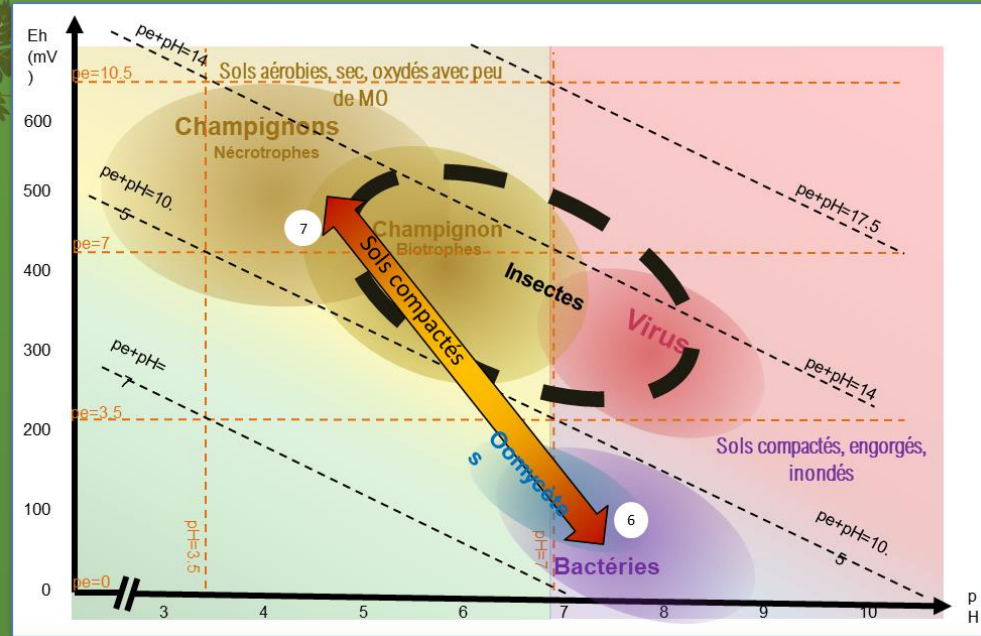


Figure 16 : alternance de biogresseurs dans le cas des sols compactés (Husson, 2020).

- Lorsque l'eau se retire d'un sol compacté et inondé, il passe d'un statut Eh-pH réduit/alcalin (6 , figure 16) à un statut Eh-pH acide/oxydé (7 , figure 16): il y a donc une alternance entre les biogresseurs du type bactéries, oomycètes et les champignons nécrotrophes et biotrophes (figure 16).
- Par exemple, pour la vigne la compaction des sols entraîne une plus forte sensibilité aux engorgements d'eau qui favorisent le développement du mildiou (statut Eh-pH réduite et alcalin).
 En conséquence, on traite au sulfate de cuivre qui oxyde la plante et dès que le sol sèche on passe à un statut Eh-pH acide/oxydé favorable à l'oïdium, champignon biotrophe (7 , figure 16).
 On traite alors au soufre (qui réduit la plante) et on compacte le sol. On travail alors le sol qui détruit l'activité biologique et donc sa structure: cela a pour conséquence une compaction du sol, puis un engorgement d'eau et ainsi de suite...

Approche globale et éléments de compréhension sur la lutte bio-logique

Méthode de compréhension pour installer la lutte Bio-Logique dans les systèmes de culture sur sols couverts et vivants.

Pour simplifier ce que nous avons vu jusqu'à présent, nous allons utiliser une croix rédox simplifiée pour expliquer les principes sur lesquels repose la lutte Bio-Logique.

Sur la figure 17, les conditions Eh-pH favorables au développement des plantes et des principaux bioagresseurs sont indiquées en jaune.

Lorsque le statut Eh-pH d'une plante n'est pas dans sa zone favorable de croissance, elle peut être confrontée à différents bioagresseurs.

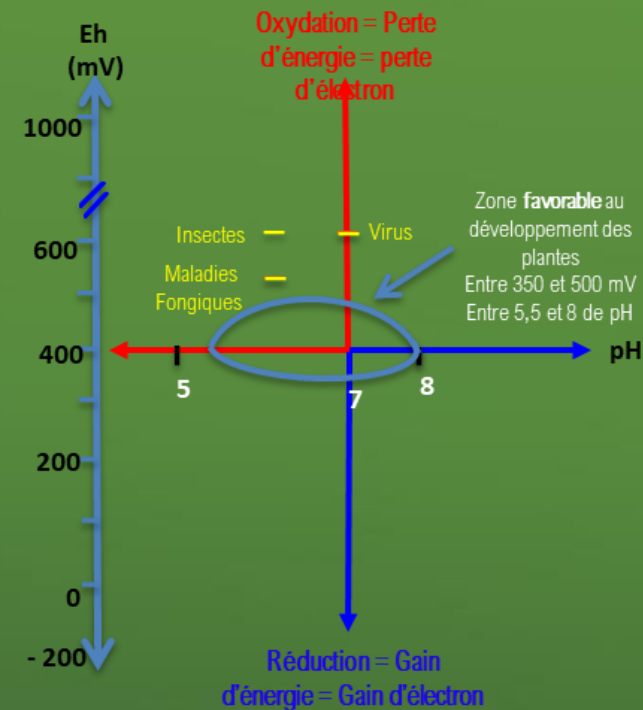


Figure 17: croix rédox et monde rédox simplifié (Schreiber 2020, ce schéma n'est pas à l'échelle).

Approche globale et éléments de compréhension sur la lutte bio-logique

- Pour lutter contre les bioagresseurs on surexyde le système sol/plante grâce à des produits phytosanitaires (1 figure 18, Eh du sol et de la plante augmente fortement).
- Mais la plante gagne des électrons grâce à la photosynthèse: son état de surexydation diminue (photosynthèse = réduction). Elle redevient oxydé et se remet ainsi en zone « maladies » (2 figure 18).
- Il faut donc retraiter la plante pour la remettre dans un état de surexydation, état inaccessible aux bioagresseurs.

Oxydation = action de l'oxygène = perte d'électrons

Action du travail du sol

- Injection d'oxygène, oxydation de la MO

Actions du soleil

- Sec, Chaud

Action de la pluie

- Contient de l'oxygène dissous

Toutes les fertilisations avec oxygène

- NO_3^- , SO_3 , SO_4^{2-} , P_2O_5 , K_2O , CaO , MgO , ...

Tous les produits phytosanitaires

- CuSO_4 , herbicides, fongicides, insecticides

- Les pratiques agricoles ont tendance à trop oxyder le système plante/sol et à le mettre en situation de faiblesse face aux bioagresseurs:
 - Le travail du sol incorpore de l'oxygène et oxyde le sol,
 - L'utilisation d'engrais minéraux oxydants (sauf l'urée) vont oxyder le milieu,
 - Les produits phytosanitaires sont des hyper-oxydants pour la plante et pour le sol.

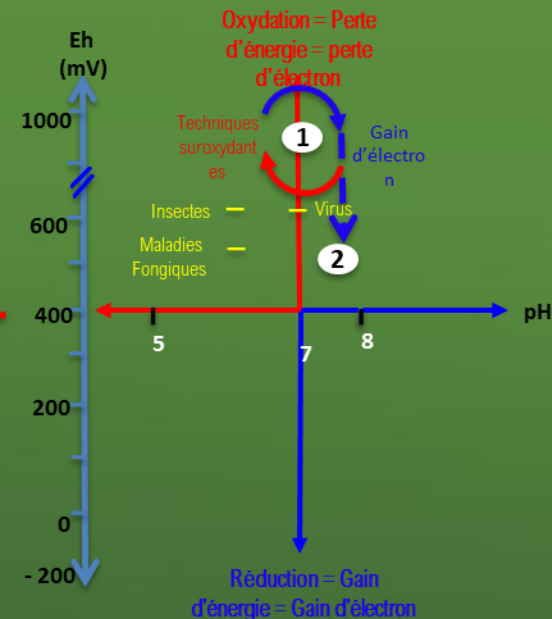
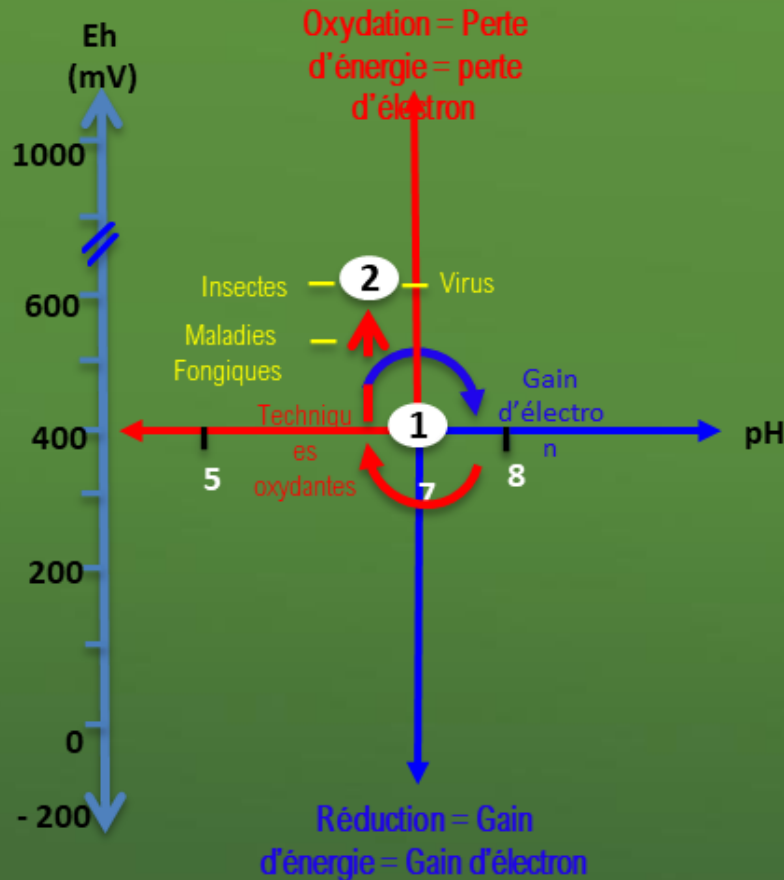


Figure 18: surexydation du système sol/plante pour sortir des conditions Eh-pH favorables aux bioagresseurs et causes générales d'oxydation du système sol/plante à gauche (Schreiber 2020, ce schéma n'est pas à l'échelle).



- L'action du soleil et de la pluie ont aussi un effet oxydant sur le milieu.

Approche globale et éléments de compréhension sur la lutte bio-logique



- Pour protéger les plantes, on pourrait « réduire » le système sol/plante (**1** , figure 19).
- Mais avec l'action d'un climat chaud et humide, la plante s'oxyde de nouveau (perte d'électrons) et se met en zone « maladies » (**2** figure 19).

Figure 19: oxydation naturelle du système sol/plante par action du climat (Schreiber 2020, ce schéma n'est pas à l'échelle).

Approche globale et éléments de compréhension sur la lutte bio-logique

- Il s'agit alors de prévenir les maladies par l'apport d'acides organiques riches en électrons (figure 20) et de jouer sur des leviers agronomiques (figure 20 à gauche) pour favoriser la réduction dans le système sol/plante contrebalançant ainsi l'action oxydante d'un climat chaud et humide et plus généralement des stress biotiques et abiotiques.

Apport préventif d'acides organiques

Action de la photosynthèse

- Récupération d'électrons par le cycle de Calvin

Actions des résidus

- Paille // bois // feuilles // racines // résidus // Humus // MO Sol

Action des effluents

- Fumiers // compost // lisiers // digestat // ...

Action de l'absence d'oxygène

- Activité biologique, hydromorphie, compaction, type de sols

Toutes les fertilisations sans oxygène

- NH_4^+ , NH_2 , NH_3 , oligoéléments, ...

Tous les acides organiques

- Acide ascorbique // Lactique // Humique // fulvique
- (Citrique ? Acétique ? Aspirine ?)

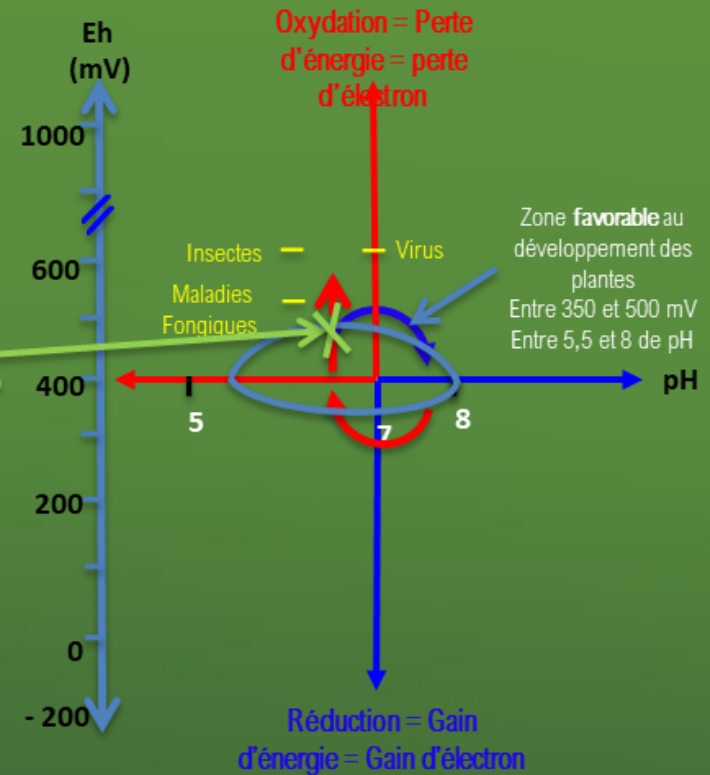


Figure 20: Leviers agronomiques et apport préventif d'acides organiques permettant à la plante de diminuer son Eh et ainsi de rester dans un état rédox réduit (Schreiber 2020, ce schéma n'est pas à l'échelle).

Approche globale et éléments de compréhension sur la lutte bio-logique

- Certaines pratiques agricoles limitent l'oxydation:
 - ✓ Un sol couvert et jamais travaillé,
 - ✓ Un sol bien structuré (bonne porosité) favorisant l'activité biologique et donc la respiration microbienne qui en consommant l'oxygène du sol évite l'hyperoxydation ou l'hyper-réduction et a tendance à réduire le milieu,
 - ✓ L'augmentation du taux de matière organique dans le sol permet de:
 - réduire les fluctuations du potentiel rédox grâce à son un fort pouvoir tampon,
 - limiter l'hyper-oxxydation ou l'hyper-réduction du sol,
 - augmenter la taille du réservoir en électrons.
 - ✓ Pulvérisations foliaires pour prévenir des carences en éléments minéraux (les carences en Mg, N, Fe, P et Mn font chuter la photosynthèse) et ainsi augmenter la photosynthèse et l'exsudation racinaire qui stimule et nourrit la microflore,
 - ✓ L'utilisation de produits fortement réduits à base d'antioxydants (vitamine C, purins ou vins de plantes, etc...)

- L'apport préventif d'acides organiques (acide ascorbique, acide lactique, acide humique, etc...) permettent de limiter l'oxydation de la plante et ainsi de ne pas « retourner » dans la zone des maladies (Cf figure 20). Par exemple l'acide ascorbique (ou vitamine C) est un donneur d'électrons et lorsqu'il est pulvérisé sur les plantes, il leur permet de rester dans un état réduit hors « zone maladies ».

Bailly, C., El, H. M. B., & Corbineau, F. (2008). Seed dormancy alleviation and oxidative signaling. *Journal de la Société de biologie*, 202(3), 241-248.

Benada, J. (1966). The gradients of oxidation-reduction potentials in cereals and the dependence of obligate parasites on the redox potentials of the host tissues. *Journal of Phytopathology*, 55(3), 265-290.

Brady, N. C., Weil, R. R., & Brady, N. C. (2010). *Elements of the nature and properties of soils* (No. 631.4 B733E.). Upper Saddle River, NJ: Pearson educational international.

Brugidou, C., Opalka, N., Yeager, M., Beachy, R. N., & Fauquet, C. (2002). Stability of rice yellow mottle virus and cellular compartmentalization during the infection process in *Oryza sativa* (L.). *Virology*, 297(1), 98-108.

Chaignon, V., Bedin, F., & Hinsinger, P. (2002). Copper bioavailability and rhizosphere pH changes as affected by nitrogen supply for tomato and oilseed rape cropped on an acidic and a calcareous soil. *Plant and Soil*, 243(2), 219-228.

Charlet, L., Scheinost, A. C., Tournassat, C., Grenèche, J. M., Géhin, A., Fernández-Martí, A., ... & Brendle, J. (2007). Electron transfer at the mineral/water interface: Selenium reduction by ferrous iron sorbed on clay. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(23), 5731-5749.

Chesworth, W. (2004). Redox, soils, and carbon sequestration. *Edafología*, 11(1), 37-43.

Davet, P. (1996). *Vie microbienne du sol et production végétale*. Editions Quae.


DeLaune, R. D., Pezeshki, S. R., & Lindau, C. W. (1998). Influence of soil redox potential on nitrogen uptake and growth of wetland oak seedlings. *Journal of Plant Nutrition*, 21(4), 757-768.

Dietz, K. J., & Pfannschmidt, T. (2011). Novel regulators in photosynthetic redox control of plant metabolism and gene expression. *Plant Physiology*, 155(4), 1477-1485.

Dyakov, Y., Dzhavakhiya, V., & Korpela, T. (Eds.). (2007). *Comprehensive and molecular phytopathology*. Elsevier.

Georgiou, C. D., Sun, H. J., McKay, C. P., Grintzalis, K., Papapostolou, I., Zisimopoulos, D., ... & Margiolaki, I. (2015). Evidence for photochemical production of reactive oxygen species in desert soils. *Nature communications*, 6(1), 1-11.

Ghezzi, P. (2005). Review regulation of protein function by glutathionylation. *Free radical research*, 39(6), 573-580.



Gillet, F. X., Cattoni, D. I., Petiot-Bécard, S., Delalande, F., Poignavent, V., Brizard, J. P., ... & Brugidou, C. (2013). The RYMV-encoded viral suppressor of RNA silencing P1 is a zinc-binding protein with redox-dependent flexibility. *Journal of molecular biology*, 425(14), 2423-2435.

Goggin, F. L., Avila, C. A., & Lorence, A. (2010). Vitamin C content in plants is modified by insects and influences susceptibility to herbivory. *Bioessays*, 32(9), 777-790.

Hell, R. (2017). Nothing in Biology Makes Sense But in the Light of Redox Regulation. *Plant and Cell Physiology*, 58(11), 1823-1825.

Hinsinger, P., Plassard, C., Tang, C., & Jaillard, B. (2003). Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. *Plant and soil*, 248(1-2), 43-59.

Huner, N. P. A., Maxwell, D. P., Gray, G. R., Savitch, L. V., Krol, M., Ivanov, A. G., & Falk, S. (1996). Sensing environmental temperature change through imbalances between energy supply and energy consumption: redox state of photosystem II. *Physiologia Plantarum*, 98(2), 358-364.

Husson, O. (2013). Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant and Soil*, 362(1-2), 389-417.

Husson, O., Audebert, A., Benada, J., Soglonou, B., Tano, F., Dieng, I., ... & Boulakia, S. (2018). Leaf Eh and pH: a novel indicator of plant stress. Spatial, temporal and genotypic variability in rice (*Oryza sativa* L.). *Agronomy*, 8(10), 209.

Kerchev, P. I., Karpińska, B., Morris, J. A., Hussain, A., Verrall, S. R., Hedley, P. E., ... & Hancock, R. D. (2013). Vitamin C and the abscisic acid-insensitive 4 transcription factor are important determinants of aphid resistance in *Arabidopsis*. *Antioxidants & redox signaling*, 18(16), 2091-2105.

Macías, F., & Arbestain, M. C. (2010). Soil carbon sequestration in a changing global environment. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15(6), 511-529.

Marschner, H., Römheld, V., Horst, W. J., & Martin, P. (1986). Root-induced changes in the rhizosphere: Importance for the mineral nutrition of plants. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 149(4), 441-456.

Patsoukis, N., & Georgiou, C. D. (2007). Effect of glutathione biosynthesis-related modulators on the thiol redox state enzymes and on sclerotial differentiation of filamentous phytopathogenic fungi. *Mycopathologia*, 163(6), 335-347.

Pfannschmidt, T. (2003). Chloroplast redox signals: how photosynthesis controls its own genes. *Trends in plant science*, 8(1), 33-41.

Rabotnova, I. L. (1963). *The importance of physical-chemical factors (pH and rH₂) for the life activity of microorganisms* (No. TRANS-900). ARMY BIOLOGICAL LABS FREDERICK MD.

Reddy, K. R., Feijtel, T. C., & Patrick, W. H. (1986). Effect of soil redox conditions on microbial oxidation of organic matter. In *The role of organic matter in modern agriculture* (pp. 117-156). Springer, Dordrecht.

Rusanov, A. M., & Anilova, L. V. (2009). The humus formation and humus in forest-steppe and steppe chernozems of the southern Cisural region. *Eurasian Soil Science*, 42(10), 1101.

Shelobolina, E. S., Konishi, H., Xu, H., Benzine, J., Xiong, M. Y., Wu, T., ... & Roden, E. (2012). Isolation of phyllosilicate–iron redox cycling microorganisms from an illite–smectite rich hydromorphic soil. *Frontiers in Microbiology*, 3, 134.

Skylberg, U., Raulund-Rasmussen, K., & Borggaard, O. K. (2001). pH buffering in acidic soils developed under *Picea abies* and *Quercus robur*—effects of soil organic matter, adsorbed cations and soil solution ionic strength. *Biogeochemistry*, 56(1), 51-74.

Wilson, K. E., Ivanov, A. G., Öquist, G., Grodzinski, B., Sarhan, F., & Huner, N. P. (2006). Energy balance, organellar redox status, and acclimation to environmental stress. *Botany*, 84(9), 1355-1370.