

Equilibres pH-Eh, fonctionnement des systèmes cultivés et santé des plantes

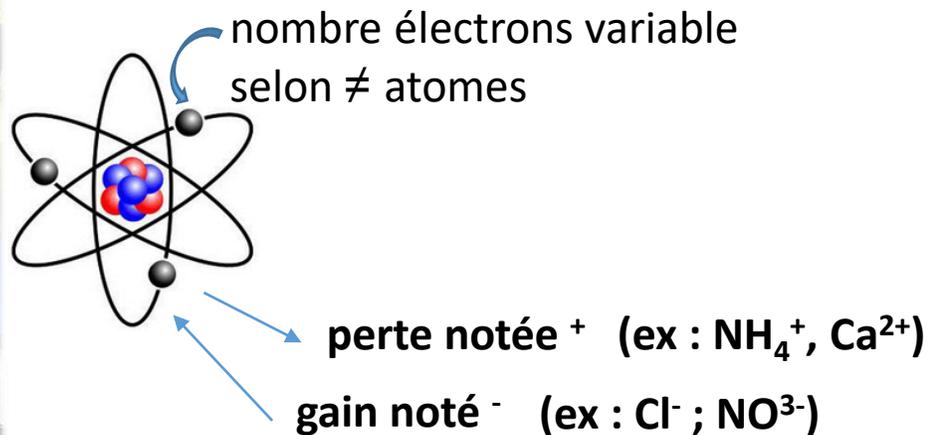
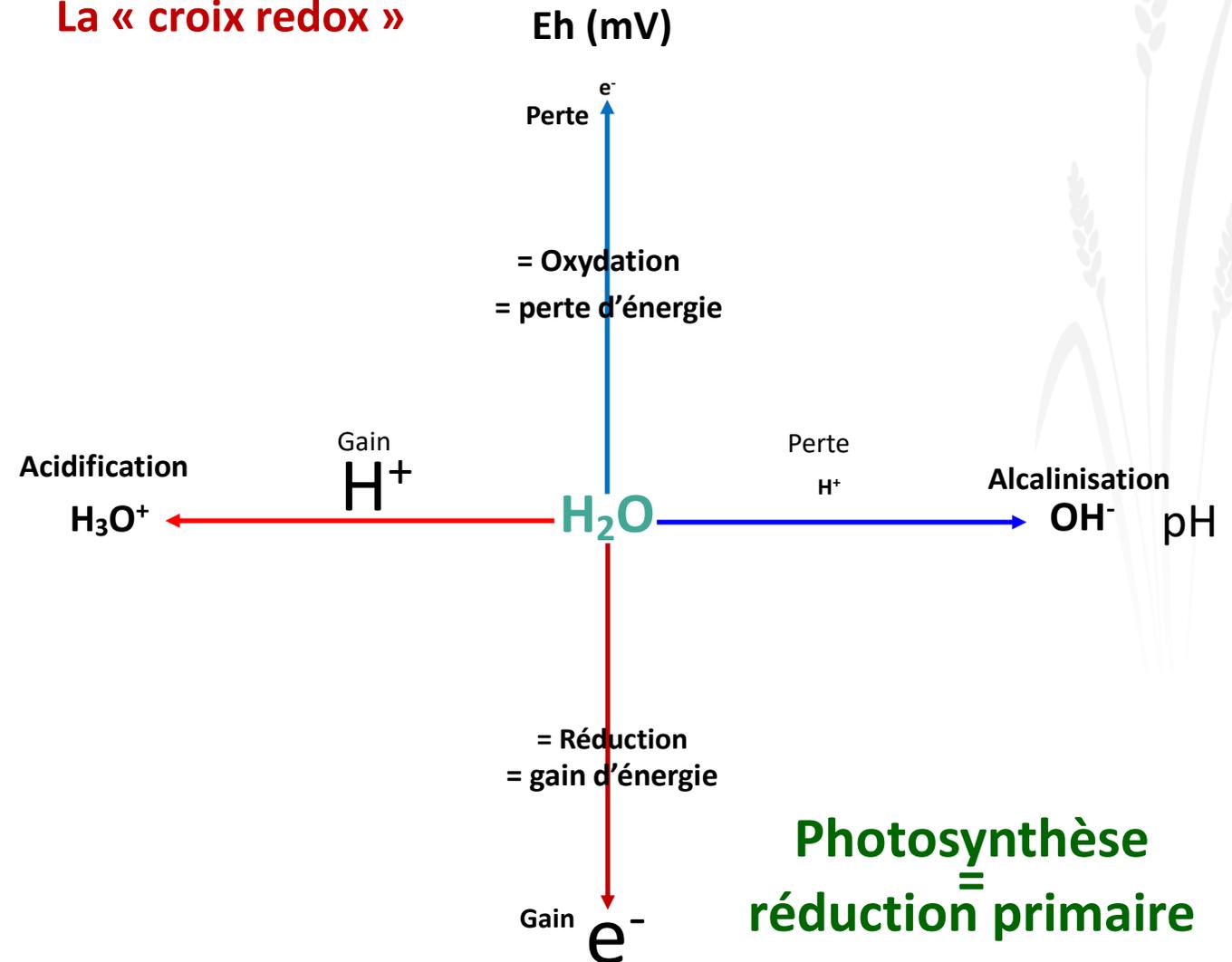


Fertilité électro-chimique des sols

Réaction redox :

= **perte** ou **gain d'électron(s)** (notés e^-), selon 'force' des atomes (seuls ou associés en molécules)

La « croix redox »



Le diagramme pH-Eh

$$Eh_{pH7} = Eh - \frac{RT}{F} \times \ln 10 \times (7 - pH)$$

A 25°C:

$$pe = Eh(mV)/59$$

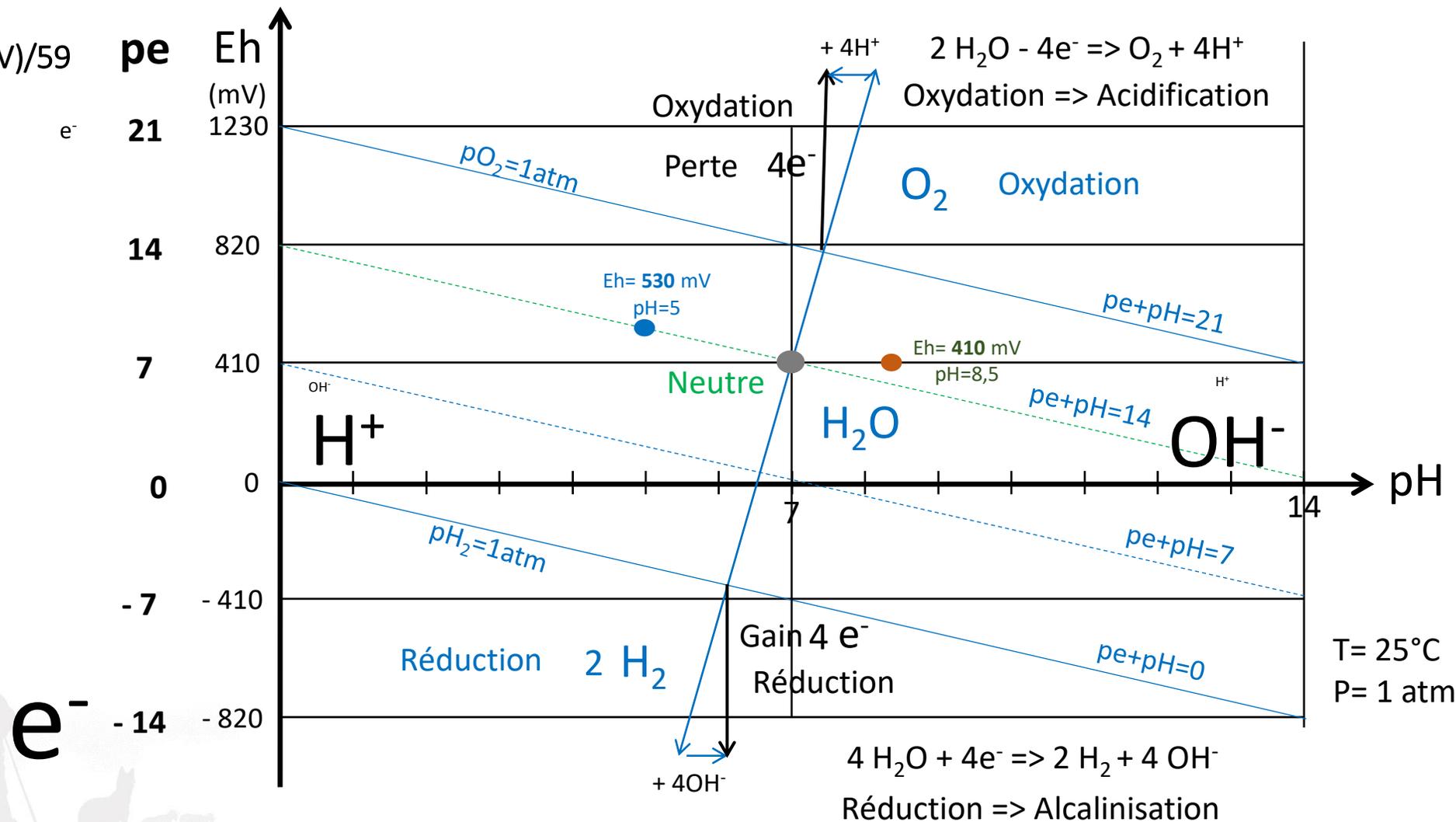
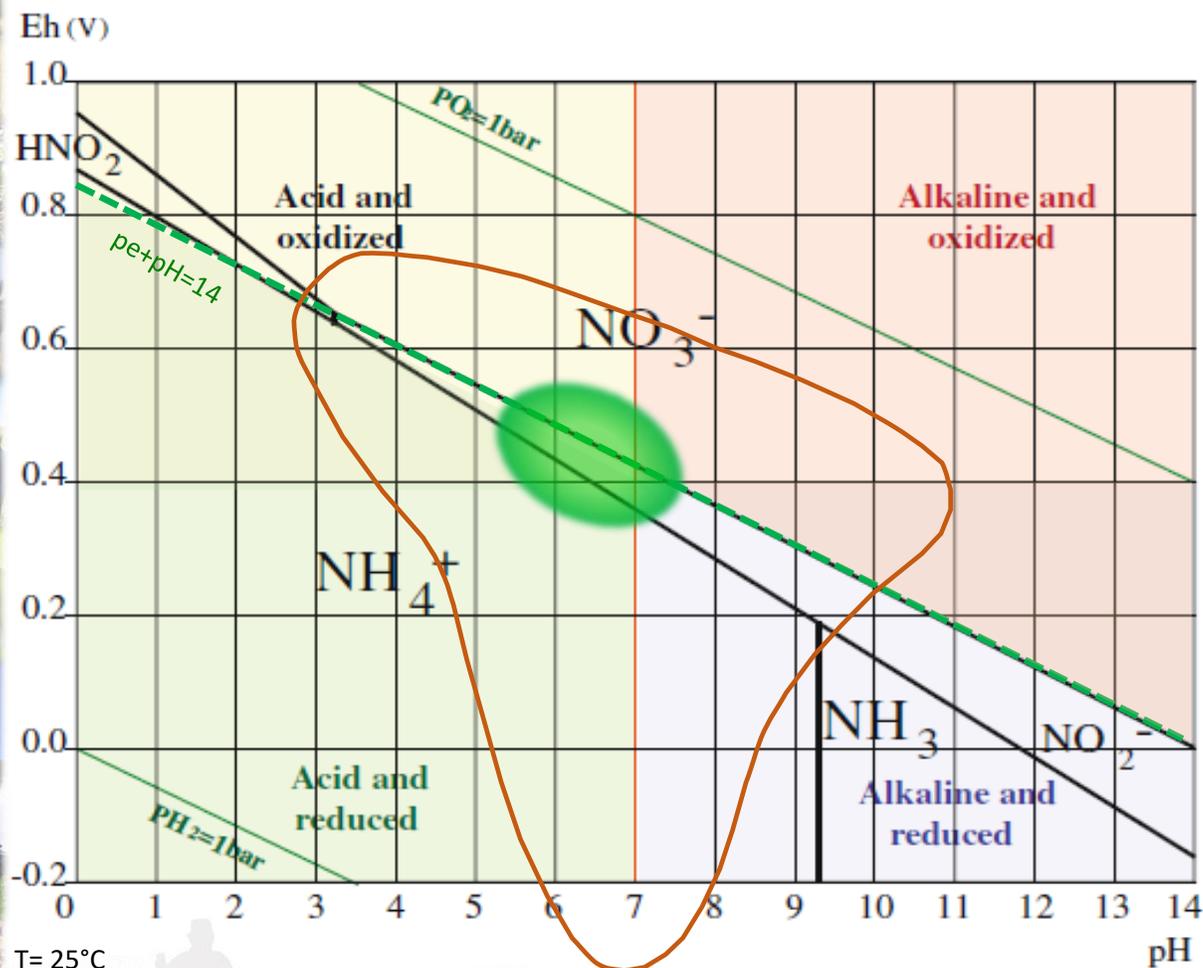


Diagramme de Pourbaix pour l'azote



T= 25°C
[N]=100µM

(Husson 2013)

pH-Eh pour les sols du monde

Meilleures conditions Eh-pH de sol pour les cultures agricoles

NO_3^- et NH_4^+ sont tous deux assimilables par les plantes, mais...

forme d'N absorbée impacte fortement physiologie :

- absorption $\text{NO}_3^- \rightarrow$ relargage $\text{OH}^- \Rightarrow \text{pH} \nearrow$
- absorption $\text{NH}_4^+ \rightarrow$ relargage $\text{H}^+ \Rightarrow \text{pH} \searrow$

==> changement pH rhizosphère

==> changement solubilité tous éléments

==> impacte nutrition plantes

==> impacte physiologie plantes

(Marschner et al. 1995)

Pourbaix, M.J.N. 1945. Thermodynamique des solutions aqueuses diluées. Représentation graphique du rôle du pH et du Potentiel. PhD Thesis Delft.

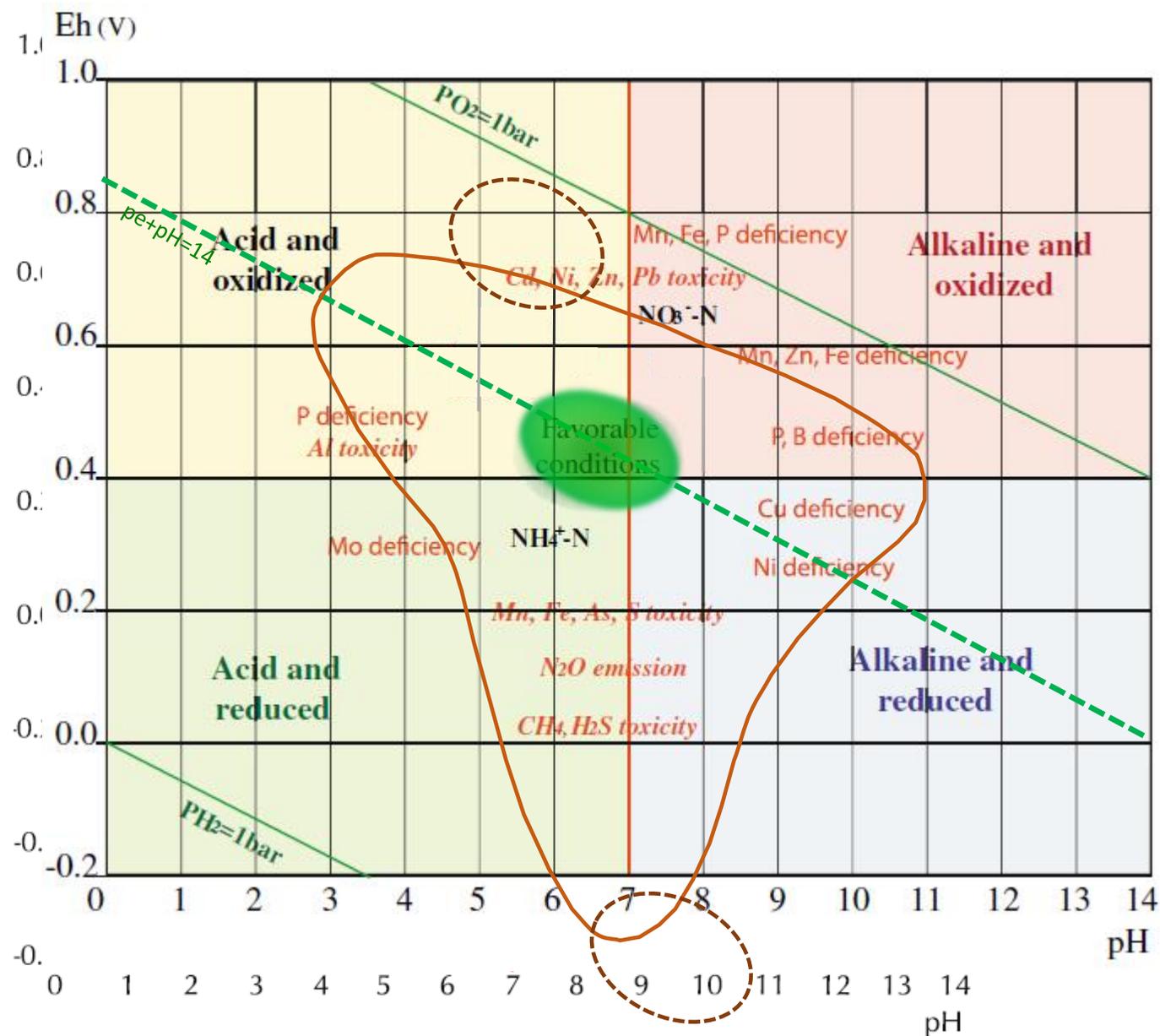
Diagramme de Pourbaix pour les **sols du monde**

pH-Eh pour les sols du monde

Meilleures conditions Eh-pH de sol pour les cultures agricoles

Mais **certains sols agricoles** sont **très oxydés** en périodes de **sécheresse**, **très réduits** en périodes **pluvieuses**

Ces sols '*faisant le yoyo*', car mal structurés : vont se trouver lors de certaines périodes, en zones de **déficience** ou de **toxicité** pour certains éléments (modulé par pH)



La santé des systèmes vivants repose très largement sur leur homéostasie (équilibre) pH-Eh

Un concept très simple, non disruptif, qui repose sur **quatre constats** fondés sur une abondante littérature scientifique (plusieurs milliers articles*) :

* la plupart des travaux cités ci-après sont synthétisés par [Husson 2013](#), [Husson et al. 2016, 2018, 2021, 2023](#)

1. Tout organisme vivant a un **domaine pH-Eh optimal spécifique**. Les **pathogènes** et **ravageurs** se développent dans des niches Eh-pH étroites
2. Les **différentes parties** des plantes correspondent à des **niches Eh-pH variables** dans l'espace et le temps, et fonction du **génotype** (espèce et variété)
3. Les conditions Eh-pH des **sols** impactent la **nutrition** et l'**homéostasie** Eh-pH des plantes. En retour, plantes + **microorganismes modifient** Eh-pH du sol
4. Les **stress environnementaux** (biotiques et abiotiques) et les **pratiques culturales** impactent Eh-pH des sols et des plantes

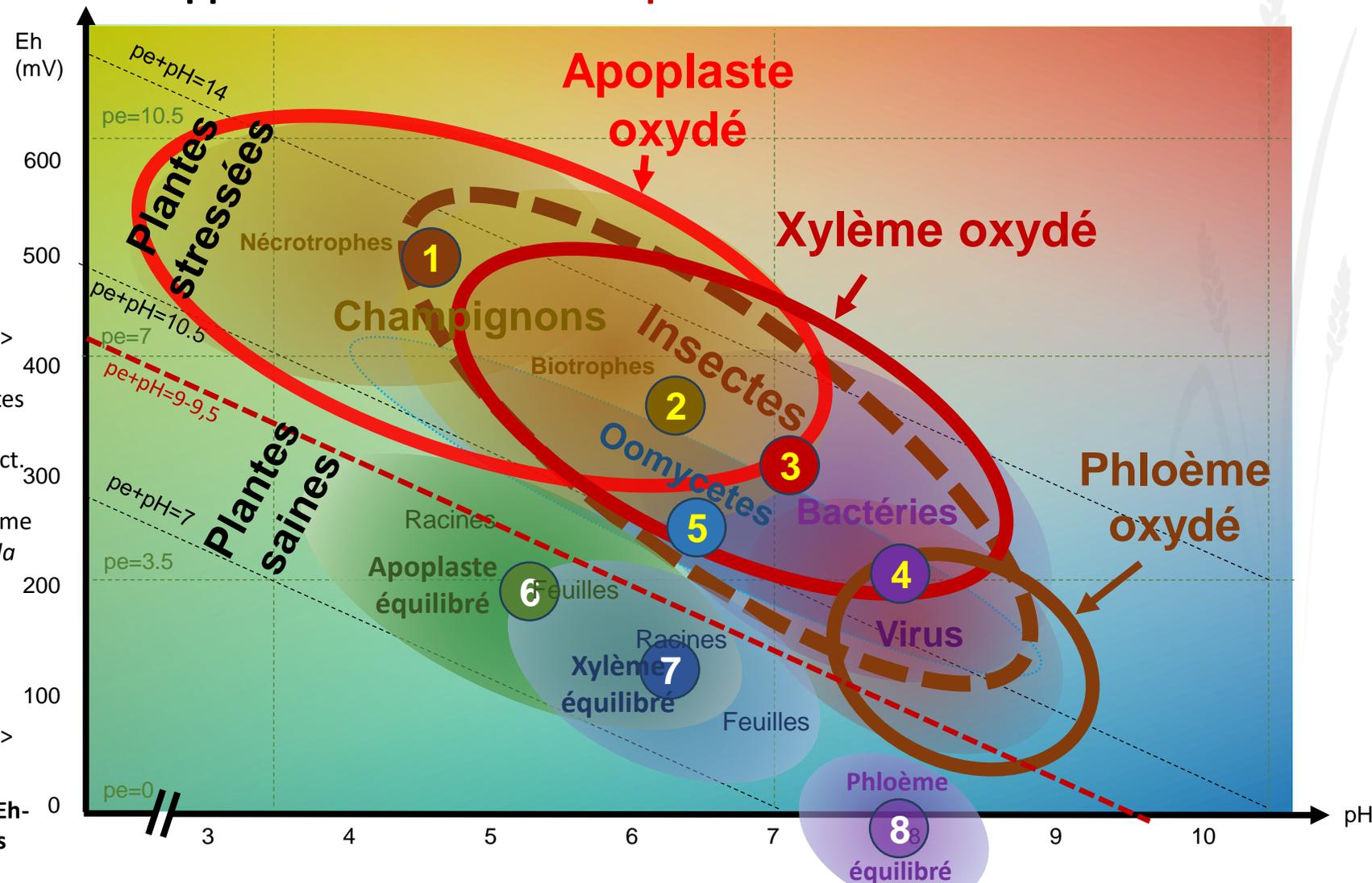
=> Les bioagresseurs attaquent les plantes déséquilibrées, car elles leur offrent des conditions Eh-pH qui leurs sont favorables

1. Les pathogènes et ravageurs se développent dans des niches Eh-pH étroites

Microorgan. pathogènes ont généralement gammes pH-Eh de développement restreintes
=> « cartographie » des conditions pH-Eh favorables à divers types bioagresseurs

- ❶ Cdt's très acides et 'oxydées' : # feuille entière => insectes broyeur ; # milieu extra-cell. et apoplaste => champ. nécrotrophes (svt telluriques)
- ❷ Cdt's acides et 'oxydées' : #feuille entière => insectes broyeur ; # milieu extra-cellulaire et apoplaste => champ. biotrophes (svt aériens) ; # apoplaste => bact. phytopath. *Xanthomonas* spp., *Pseudomonas* spp.
- ❸ Cdt's neutres ou peu alcalines et 'oxydées' : # xylème => champ. *Verticillium* spp. & bact. phytopath. *Xylella* spp. & insectes piqueurs-suceurs ; # phloème => champ. *Colletotrichum* spp.
- ❹ Cdt's alcalines et 'oxydées' : # phloème => bact. phytopath. *Candidatus Liberibacter* spp. & virus phytopath. & insectes piqueurs-suceurs
- ❺ Cdt's légèrement 'oxydées' à pH très spécifiques => oomycètes (mildious, pythium)

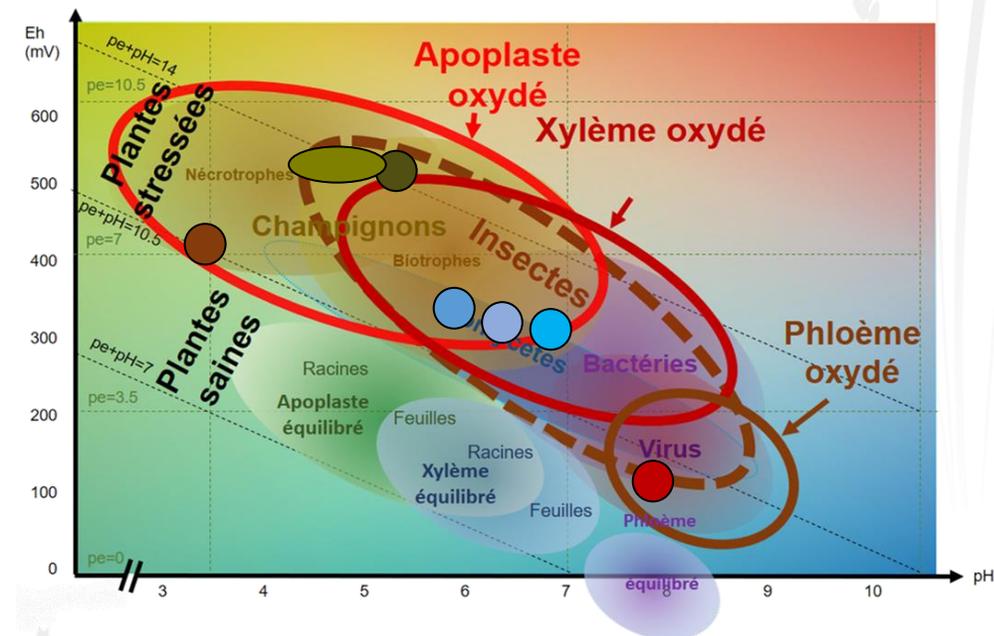
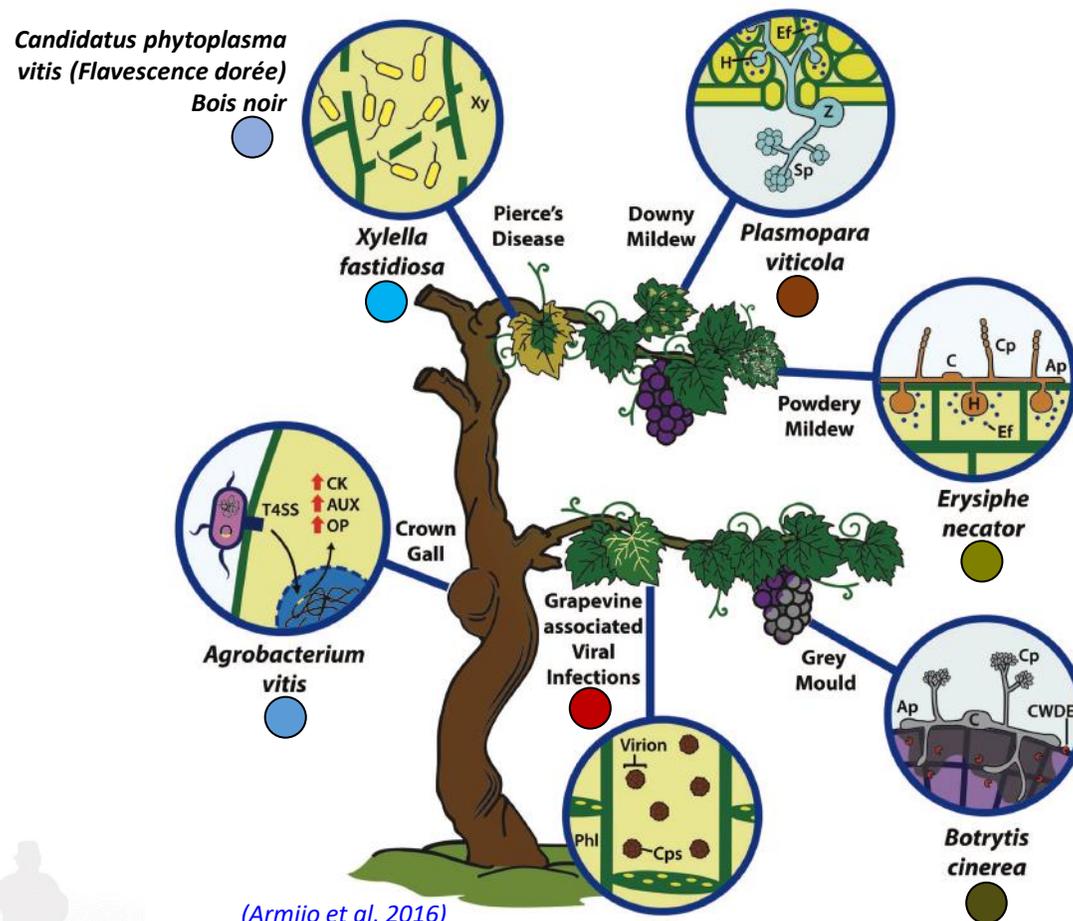
Les plantes qui peuvent maintenir leur homéostasie Eh-pH à $pe+pH < 9-9,5$, i.e. cdt's #réduites et acides dans apoplaste (❸)



!/ Une faible photosynthèse oxyde ! ← ciel nuageux, températures extrêmes, sécheresse, ombre, carence en nutriments, toxicité des métaux lourds/pesticides

1. Les pathogènes et ravageurs se développent dans des niches Eh-pH étroites

Eh-pH et les microorganismes pathogènes de la vigne



1. Les pathogènes et ravageurs se développent dans des niches Eh-pH étroites

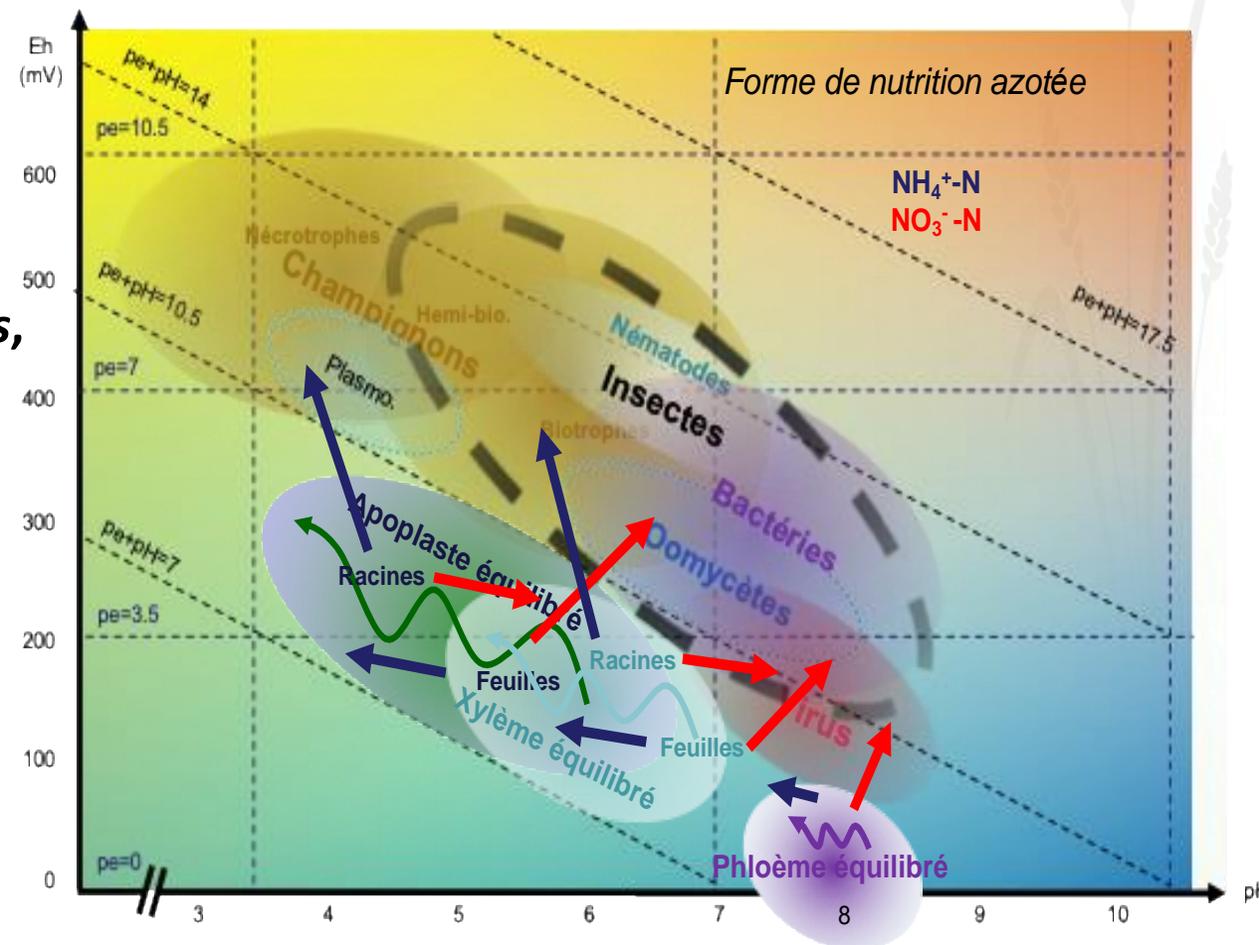
Impacts de **forme d'N** sur EH-pH des plantes et sensibilité aux bioagresseurs (Huber & Watson 1974, Datnoff et al. 2007)

NH₄⁺ :

- favorise les **champignons des racines** (souvent nécrotrophes) : *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Amilaria*, *Cercospora*, *Sclerotinium*, et les **oomycètes**
- défavorise **champi. aériens** (*Verticillium*, *Botrytis*, *Ramularia* etc.), les **virus et bactéries aériens**

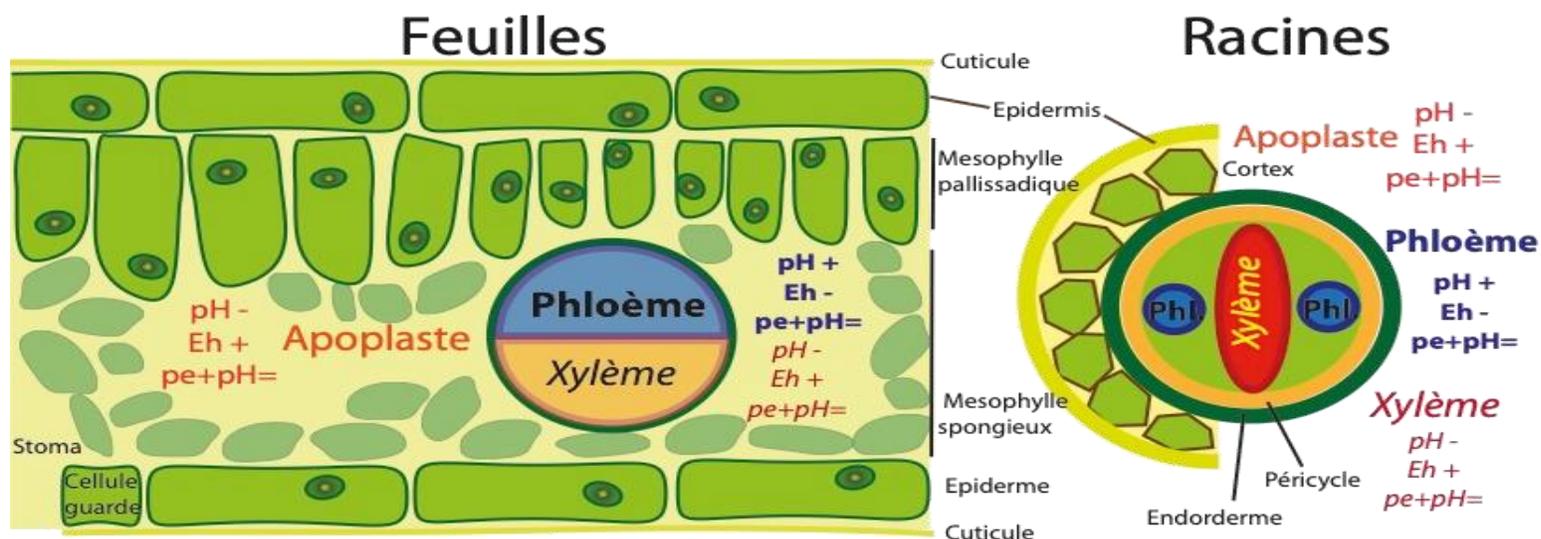
NO₃⁻ :

- défavorise les **champi. des racines** (souvent nécrotrophes) : *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Amilaria*, *Cercospora*, *Sclerotinium*
- favorise les **champi. aériens** (*Verticillium*, *Botrytis*, *Ramularia* etc.), les **virus et bactéries aériens**



2. Les **différentes parties** des plantes correspondent à des **niches Eh-pH variables** dans l'**espace** et le **temps**, et fonction du **génotype** (espèce et variété)

❖ échelle des **tissus** (de chaque partie de la plante) : **xylème & apoplaste : acides oxydés ; phloème & cell. : l'inverse**



Phloème :
 conduit sève élaborée
 => chargé en sucres, ac. aminés et ac. salicilique
 => **pH alcalin** (7,5-8,5), très régulé
 => **Eh réduit**, très tamponné
 => CE élevée

Xylème :
 conduit sève brute (= eau + élém^{ts} minéraux du sol)
 => **Eh oxydé** car moins tamponné
 => **pH acide** (5,0-6,0)
 => CE basse
 Fortes variations avec cdt^os ext.

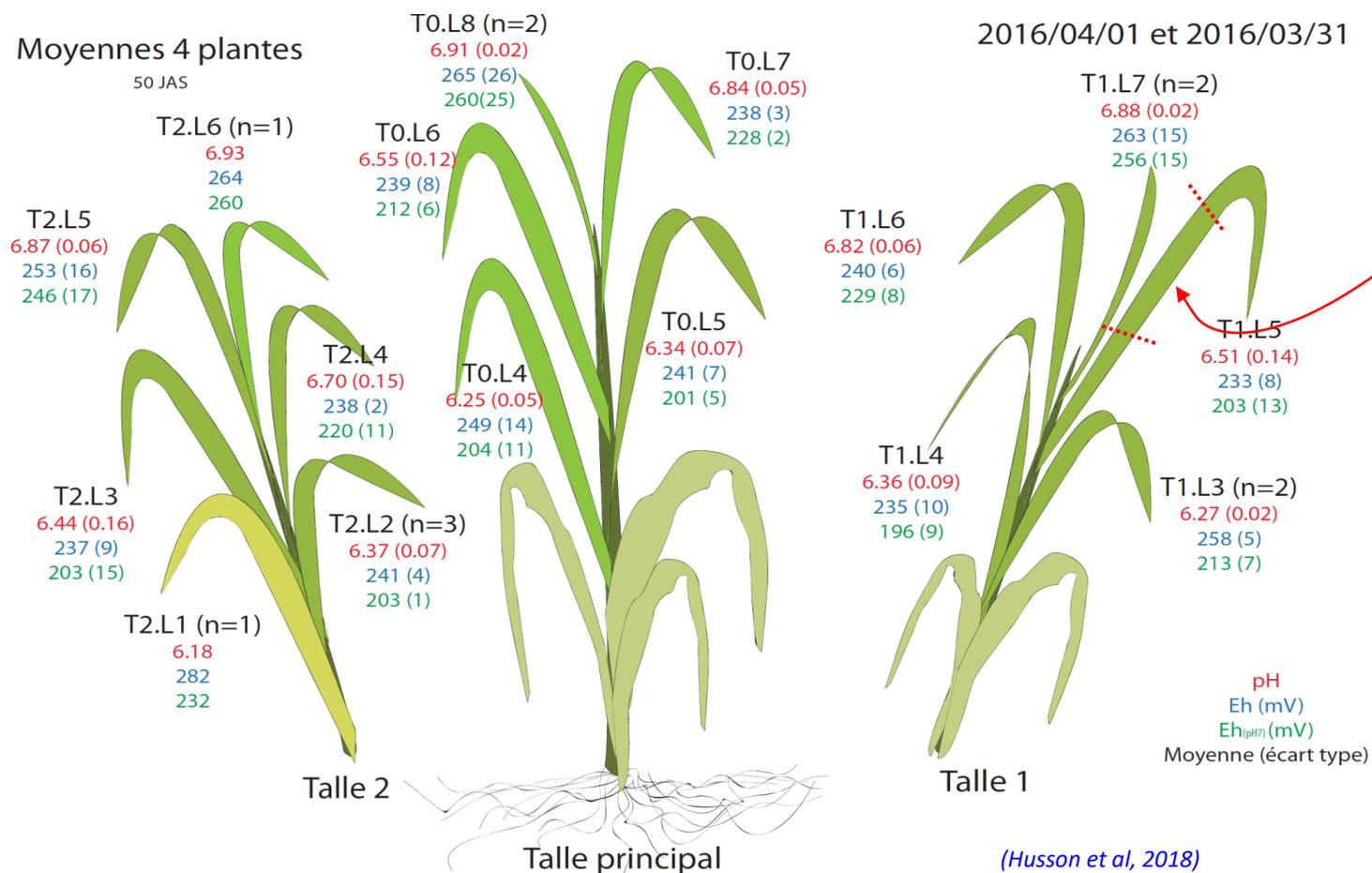
Cellules : très tamponnées, pH cytoplasme 7,3

Apoplaste : pH acide et Eh oxydé, très peu tamponné

(d'après Husson 2013)

2. Les différentes parties des plantes correspondent à des niches Eh-pH variables dans l'espace et le temps, et fonction du génotype (espèce et variété)

❖ échelle de **plante** : **gradient** : feuilles (lieu photosynthèse) plus acides et réduites que racines (variations ASC/DAH et GSH/GSSG) et tiges intermédiaires



mesure sur le tiers central de la dernière feuille en plein activité photosynthétique

Avec **âge** : **oxydation** et **acidification** des tissus (Eh \nearrow , pH \searrow)
=> **maladies de fin de cycle** (septoriose, helmintho, alternariose, sclérotinia...)

(Husson et al, 2018)

Eh-pH et santé des sols & des plantes

3. Conditions Eh-pH des sols => **nutrition** et **homéostasie Eh-pH** plantes

pH-Eh sol => solubilité éléments et nutrition des plantes

+ **microorganismes => Eh-pH sol**

<http://www.kth.se/che/medusa/>

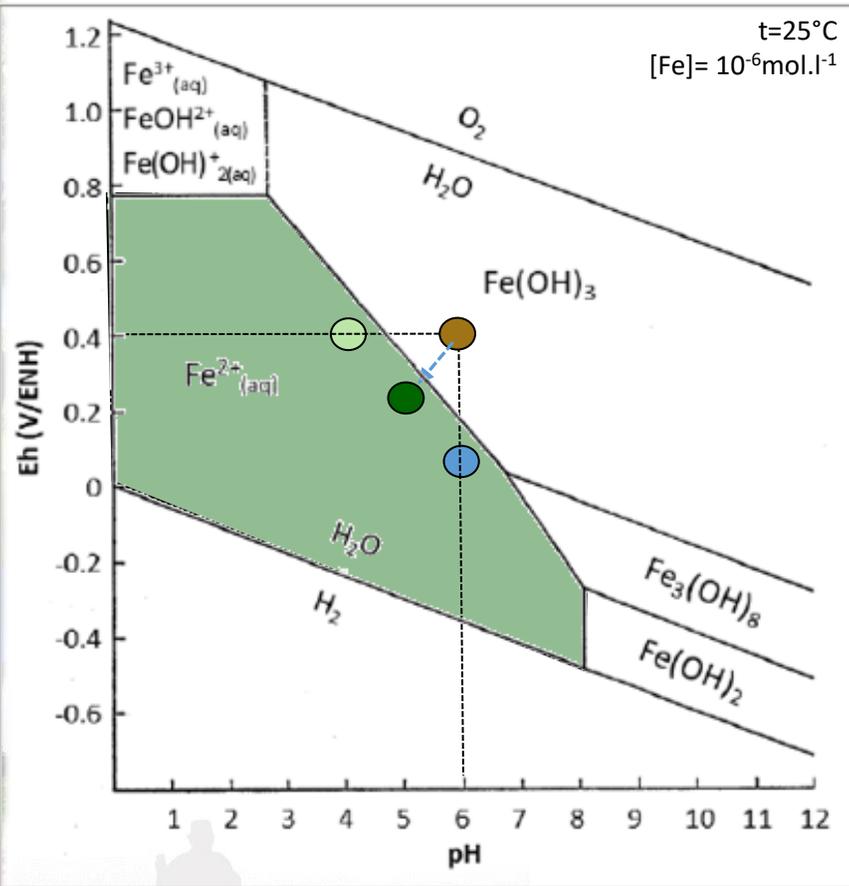
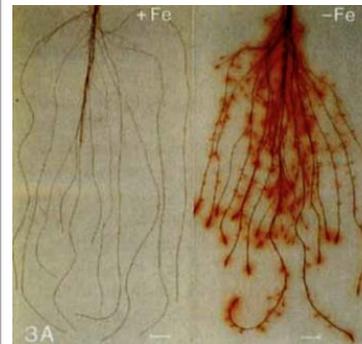
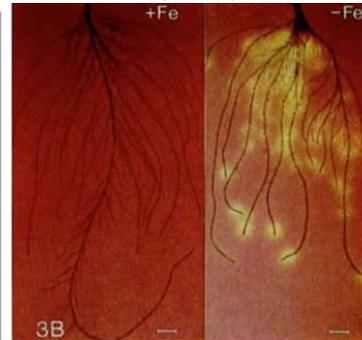
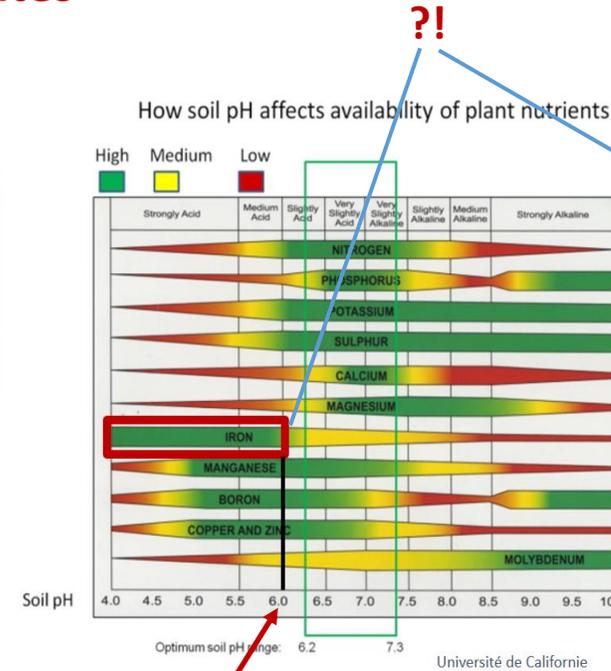


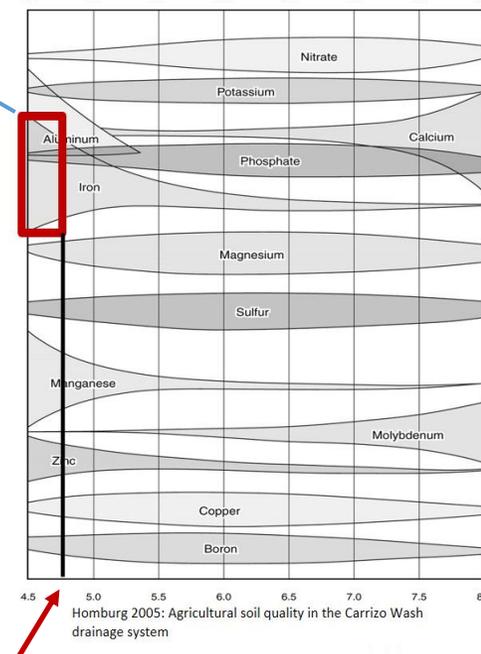
Diagramme de Pourbaix (1945) du fer, tracé par **Ponnamperuma et al. (1967)**



(Marschner et al, 1986)



?!



=> on peut mesurer le pH sans devoir mesurer le Eh
c'est ce qu'on a tj fait

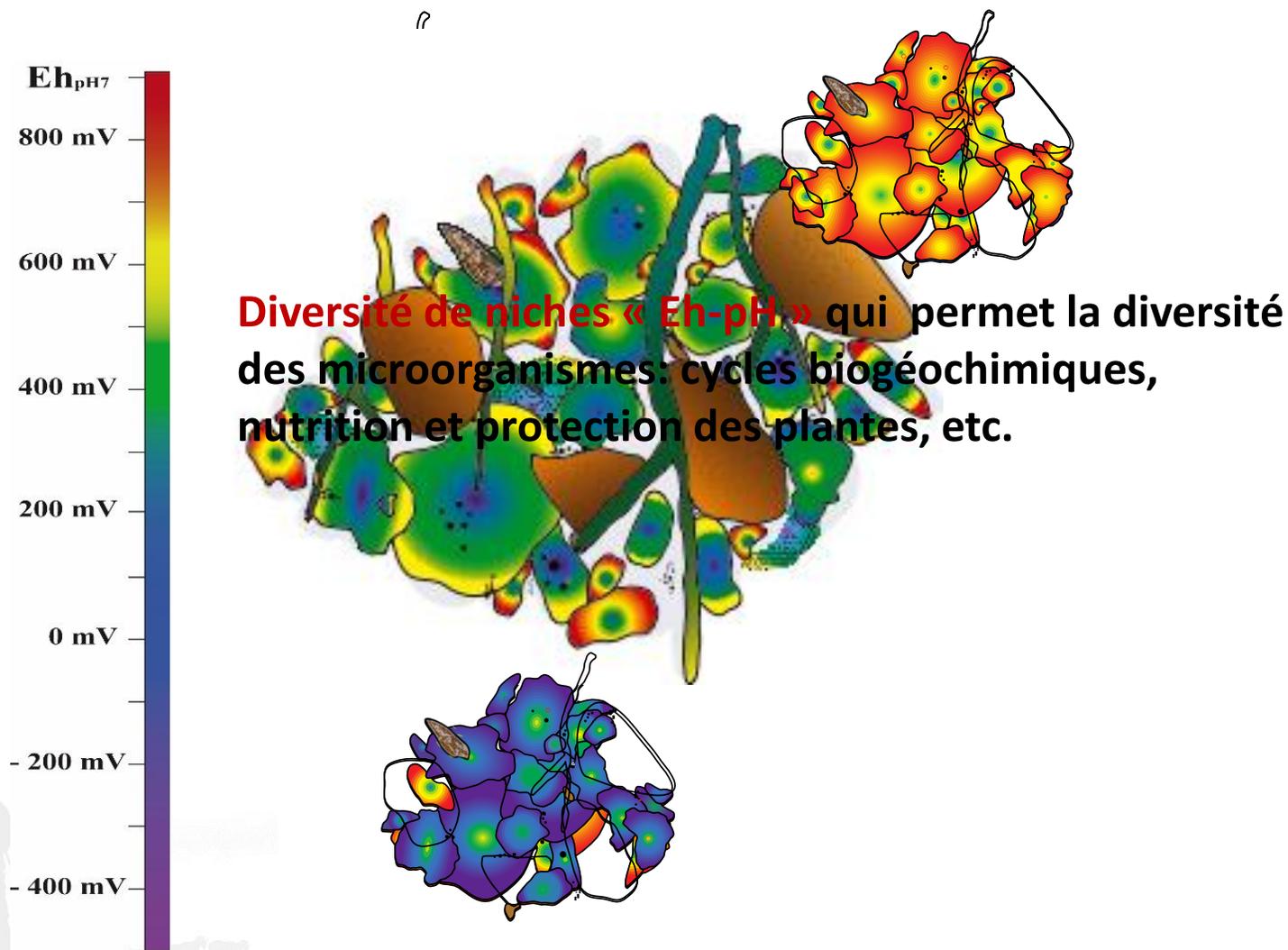
=> on ne peut pas mesurer le Eh sans mesurer le pH
on l'a enfin compris

=> pour comprendre qq chose à nutrition minérale des plantes et dynamique N (en ACS notamment), il faut aussi tenir compte du Eh sol !

et ça, ~personne ne le sait

3. Conditions Eh-pH des sols => nutrition et homéostasie Eh-pH plantes
+ microorganismes => Eh-pH sol

Importance fondamentale de la **structure du sol** pour son **Eh** et **dynamique Eh**



4. Les **stress environnementaux** (biotiques et abiotiques) et les **pratiques culturales** impactent Eh-pH des sols et des plantes

❖ Tout ce qui **réduit la photosynthèse** :

ciel nuageux
températures extrêmes
sécheresse
ombre
carence en nutriments, OE
toxicité des métaux lourds
toxicité des pesticides
forte défoliation / blessures

❖ Tout ce qui **nuit à (stabilité de) la structure sol** :

(=> /eau : excès en hiver, manque été)
travail sol intensif
manque MO
faible floculation / défloculation argiles
tassement (poids excessif des engins)

❖ **Sol nu**

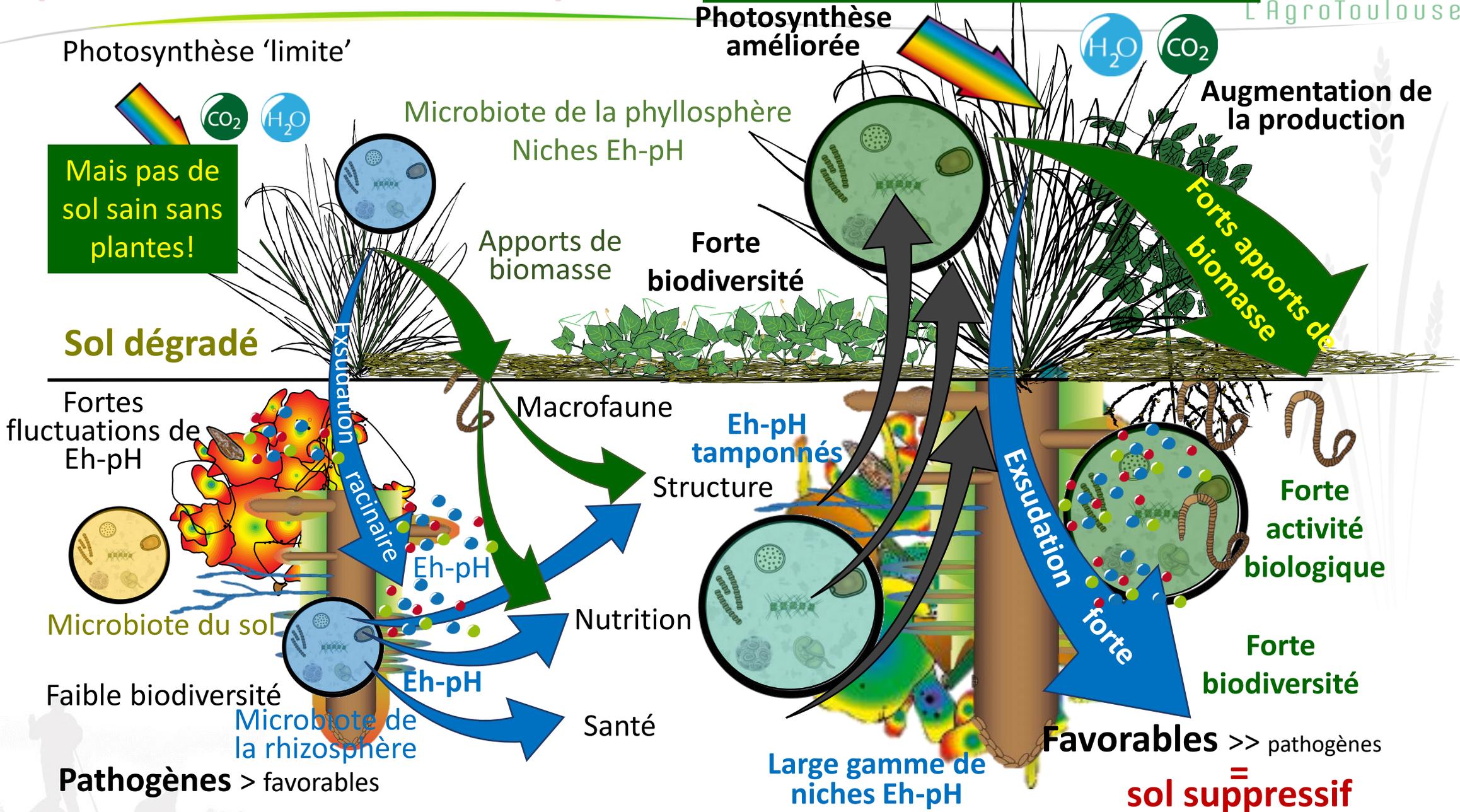
❖ **Traitements phytosanitaires** (la plupart car leur principe est suroxydation, pour tuer bioagr.)

↗ ou ↘ Eh sol



↗ Eh plantes

⇒ /! \ ↘ santé plantes



Preuve du concept

Rizières des Hauts plateaux de Madagascar, 2009-2011 :

✓ transport (2009, 2010, 2011) de sol d'une zone à sols volcaniques récents, très fertiles (classification FAO : *silandic andosol*), où la pyriculariose du riz (*Pyricularia oryzae*) est naturellement très peu présente

✓ vers une zone (à 110 km à vol d'oiseau) où les sols sont ferrallitiques, peu fertiles (classification FAO : *geric ferralsol*), et où la pyriculariose du riz est naturellement fortement présente



Betafo, zone à sols volcaniques récents

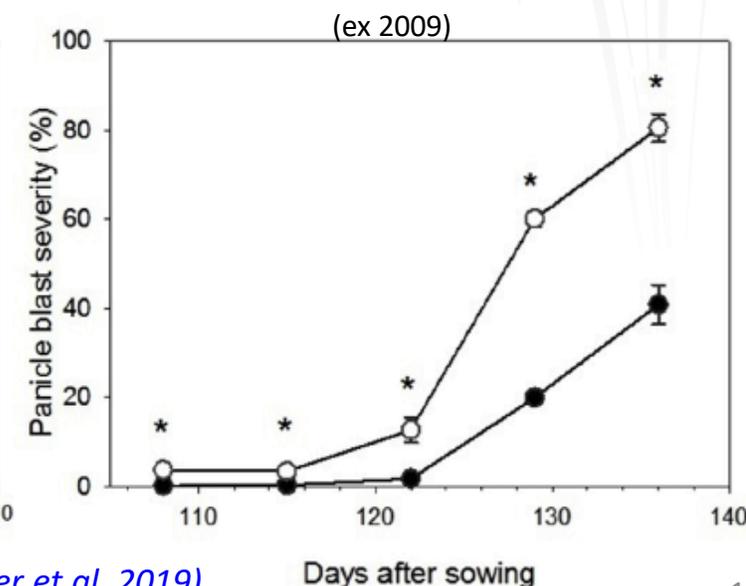
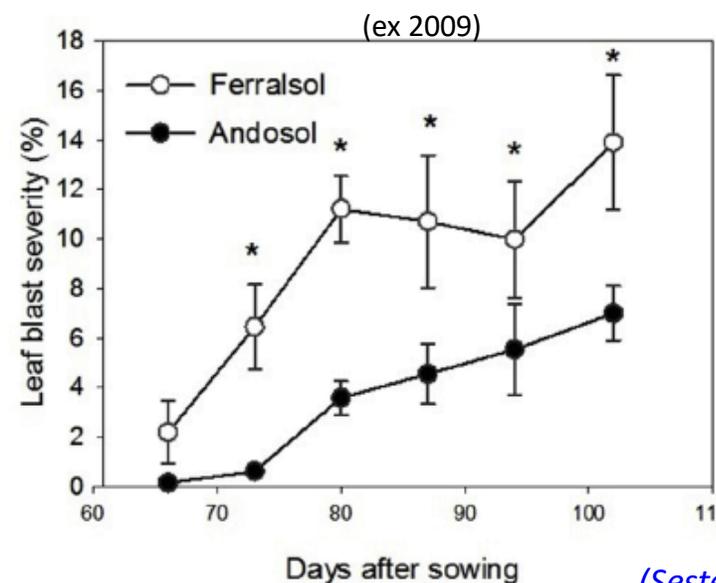


Andranomanelatra, zone à sols ferrallitiques



moins de maladie sur andosol :

- sur feuilles
- sur panicule



(Sester et al. 2019)

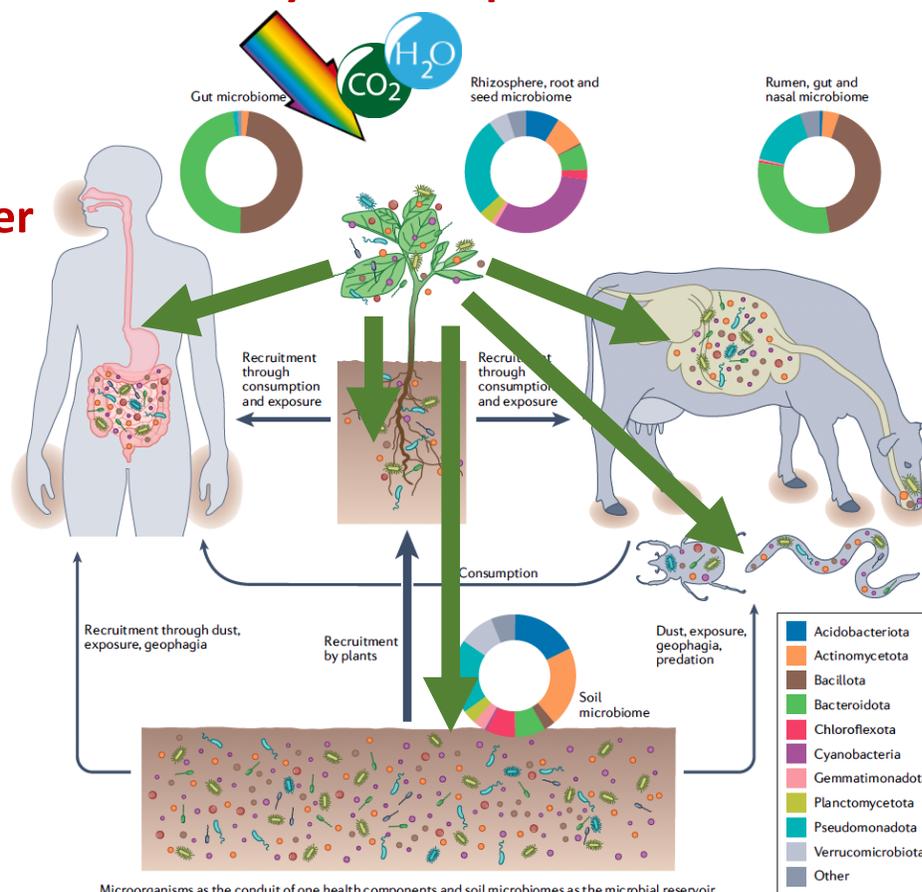
Un modèle de fonctionnement du vivant simple et élégant

Quelques principes très **simples**, mais **universels** et **fondamentaux**, très **intégrateurs**

1 - **Chaque organisme/organite** fonctionne à des niveaux **Eh-pH** spécifiques

2 - **Microorganismes** très **impactés** par **cdt°s Eh-pH** du milieu, **et** ont forte capacité à **les réguler**
=> plantes et animaux ont **« appris »** à les **utiliser**

3 - **Photosynthèse** : **pilier** de la santé des écosystèmes



Microorganisms as the conduit of one health components and soil microbiomes as the microbial reservoir

(Banerjee and van der Heijden, 2022)

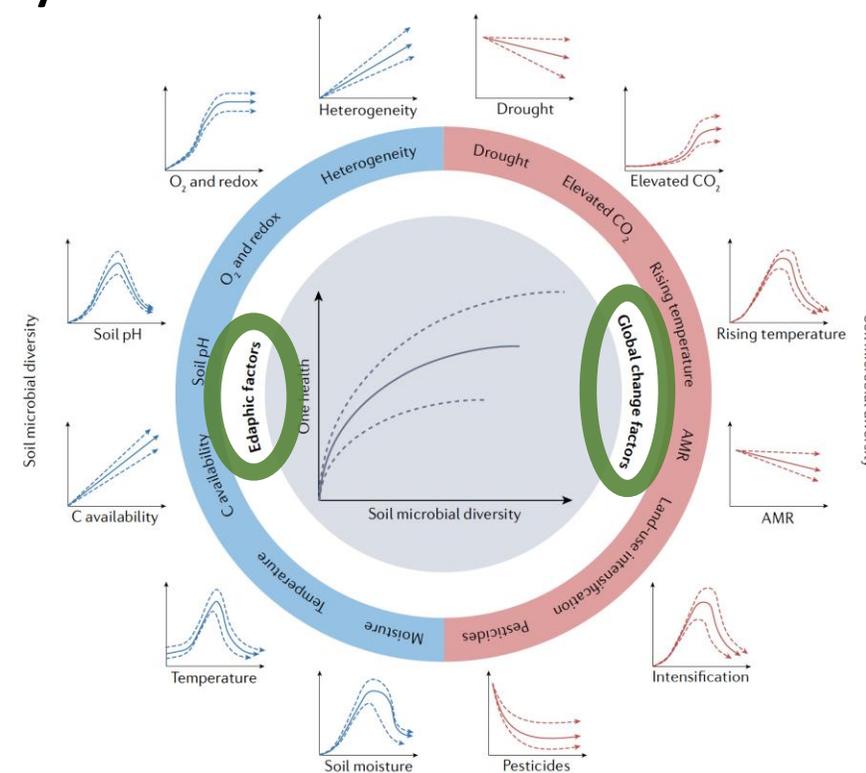
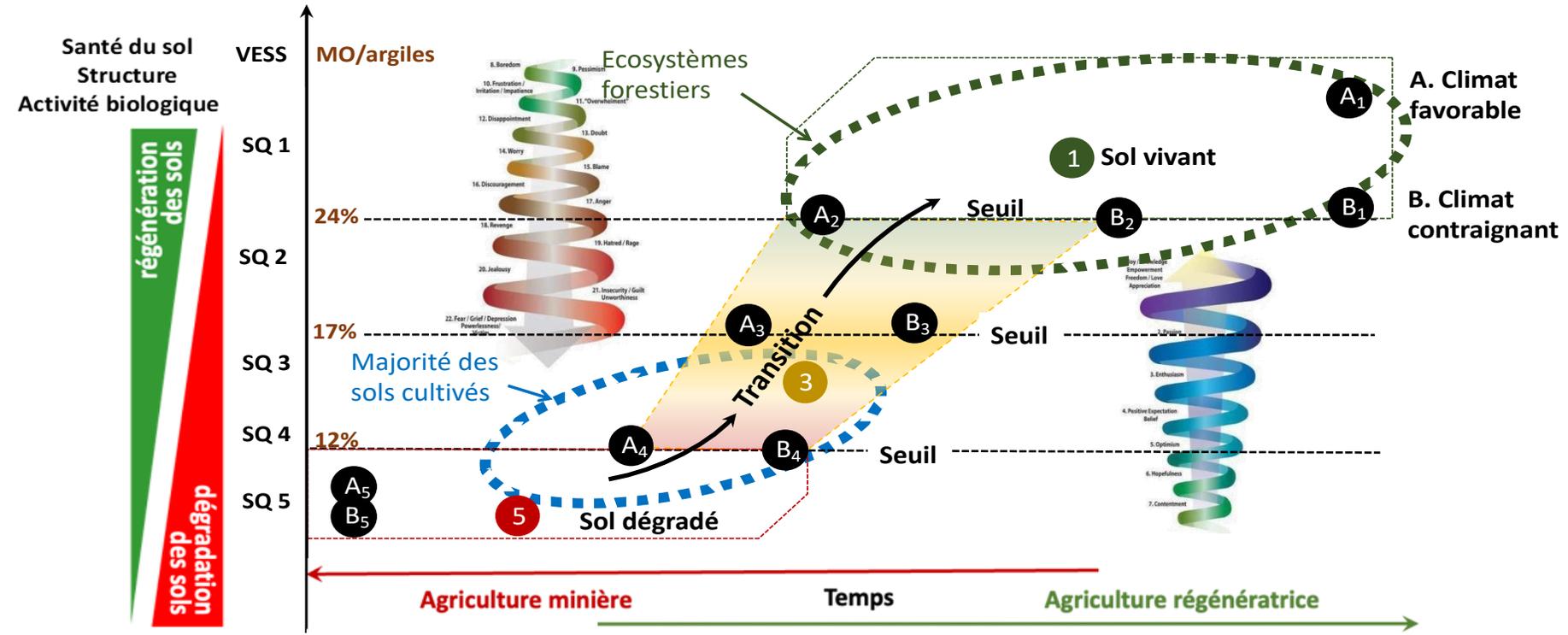


Fig. 3 | **Factors governing the soil microbial contributions to one health.** Inner circle shows the association between soil microbial diversity and one health. Dashed lines indicate that this association may be context-dependent. The nature and strength of this association will depend not only on the ecosystem, but also on a range of environmental factors. Outer circle shows edaphic and global change factors that can regulate the contribution of soil microbial diversity to one health.

Un nouveau regard (théorique*) sur état de santé dynamique des sols agricoles

*de plus en plus étayé : LaCanne & Lundgren 2018, Zheng et al. 2023

...pour adapter les pratiques, les systèmes, le conseil et la recherche, à l'état et à la dynamique de régénération/dégradation des sols



Systèmes conventionnels : moteur sol = pétrole (W sol, engrais...), phytos

Systèmes ACS : moteur sol = C apporté par photosynthèse

Mauvaise structure sol => Eh (potentiel redox) 'fait le yoyo'* => plantes s'épuisent à essayer de s'adapter et de corriger par métabolisme

Bonne structure sol => Eh (potentiel redox) ~stable** => plantes se développent bien

*période sécheresse => eau du sol disparaît car mauvaise structure => 'tout s'oxyde' => Eh ↑

**période sécheresse comme pluvieuse => sol tj avec un peu d'eau et d'O₂ => Eh ~stable

*période pluvieuse => eau stagne car mauvaise structure => 'tout se noie' et O₂ disparaît => Eh ↓

Cercle vicieux : 'moins y'en a, moins y'en a'

Cercle vertueux : 'plus y'en a, plus y'en a'

(d'après Husson et al. 2023)



Merci pour votre attention

Bibliographie citée

- Armijo G., Schlechter R., Agurto M., Muñoz D., Nuñez C., Arce-Johnson P., 2016. Grapevine Pathogenic Microorganisms: Understanding Infection Strategies and Host Response Scenarios. *Frontiers in Plant Science*, 7 <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00382>
- Banerjee S., van der Heijden M. G. A., 2022. Soil microbiomes and one health. *Nature Reviews Microbiology* <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00779-w>
- Datnoff L. E., Elmer W. H., Huber D. M., 2007. *Mineral nutrition and plant disease*, In: APS Press,
- Huber D. M., Watson R. D., 1974. Nitrogen forms and plant diseases. *Annual Reviews*, 3593 , 139-165.
- Husson O., Husson B., Brunet A., Babre D., Alary K., Sarthou J. P., Charpentier H., Durand M., Benada J., Henry M., 2016. Practical improvements in soil redox potential (Eh) measurement for characterisation of soil properties. Application for comparison of conventional and conservation agriculture cropping systems. *Analytica Chimica Acta*, 906 , 98-109.
- Husson O., Sarthou J. P., Duru M., 2023. Référentiels et nouveaux indicateurs pour fonder une agriculture régénératrice. *Agronomie, Environnement et Société*, 13 (2) <https://doi.org/10.54800/ohj587>
- Husson Olivier, 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. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1429-7>
- Husson Olivier, Brunet A., Babre D., Charpentier H., Durand M., Sarthou J.-P., 2018. Conservation Agriculture systems alter the electrical characteristics (Eh, pH and EC) of four soil types in France. *Soil and Tillage Research*, 176 , 57-68. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.11.005>
- Husson Olivier, Sarthou J.-P., Bousset L., Ratnadass A., Schmidt H.-P., Kempf J., Husson B., Tingry S., Aubertot J.-N., Deguine J.-P., Goebel F.-R., Lamichhane J. R., 2021. Soil and plant health in relation to dynamic sustainment of Eh and pH homeostasis: A review. *Plant and Soil*, 466 (1-2), 391-447. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05047-z>
- 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. <https://doi.org/10.1002/jpln.19861490408>
- Marschner Horst, 1995. *Mineral nutrition of higher plants*, In: *Second edi*,
- Ponnamperuma F. N., M T. E., Loy T., 1967. Redox equilibria in flooded soil:i. the iron hydroxide systems. *Soil Science*, 103 (6), 374-382.
- Sester M., Raveloson H., Tharreau D., Becquer T., 2019. Difference in blast development in upland rice grown on an Andosol vs a Ferralsol. *Crop Protection*, 115 , 40-46. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.09.010>