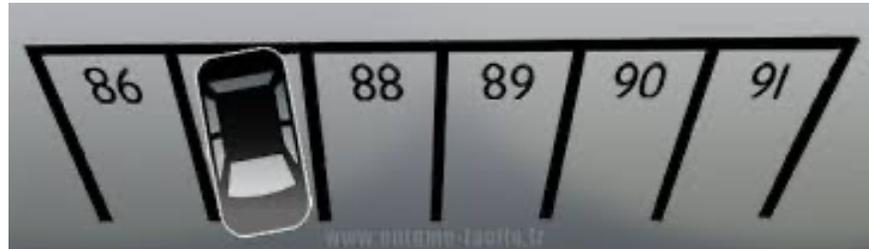
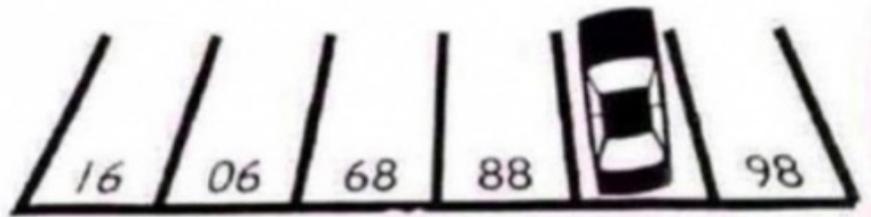


# Equilibres pH, potentiel redox et conductivité électrique Intérêts de la « bioélectronique » dans le cadre d'une approche « santé unique »

Olivier Husson  
CIRAD/PERSYST/AIDA Equipe PROSE

La Ruche, Montpellier, 13 juin 2024

# Quand on n'arrive pas à résoudre un problème...



**C'est souvent qu'on ne le regarde pas comme il faut.  
Il faut changer de perspective !**

**Essayer de créer des ponts entre disciplines, approches, etc.**

**Antioxydants, équilibre acido-basique, microbiote, énergie, maladies, etc...**



# Pourquoi le potentiel REDOX (REDuction-OXYdation)?

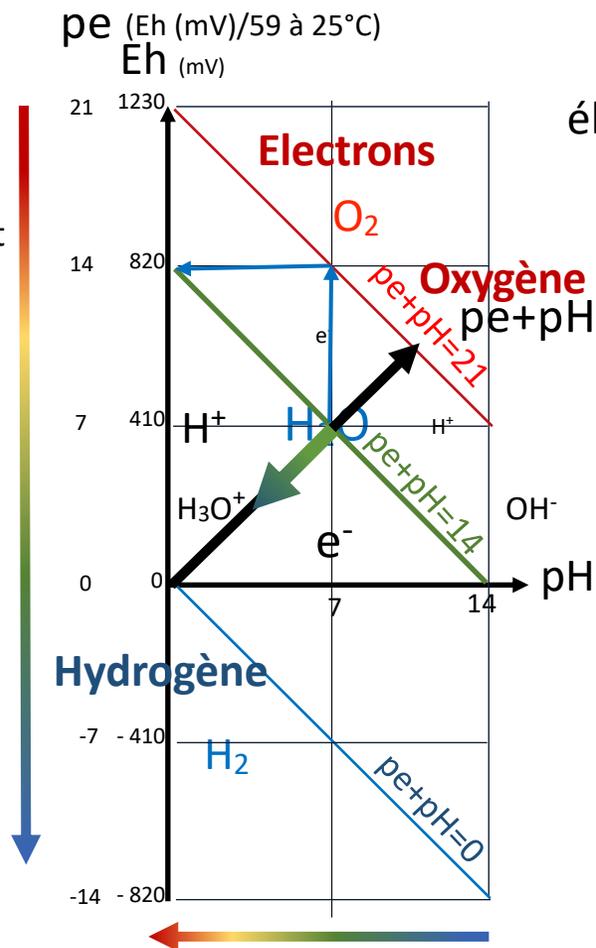


Louis Claude Vincent  
1947  
Fondateur de la bioélectronique

« Disponibilité » des électrons ( $e^-$ ) = le niveau d'oxydation

P= 1 atm.  
t=25°C

## L'oxydation en chimie vs biologie



« Disponibilité » des protons ( $H^+$ )

Albert Szent-Györgyi  
Prix Nobel de Physiologie

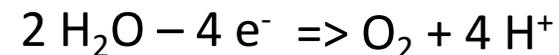
1937

Fondateur de la bioénergétique



« La vie est un petit courant électrique entretenu par le soleil »

De l'eau qui perd des électrons => de l'oxygène est des protons



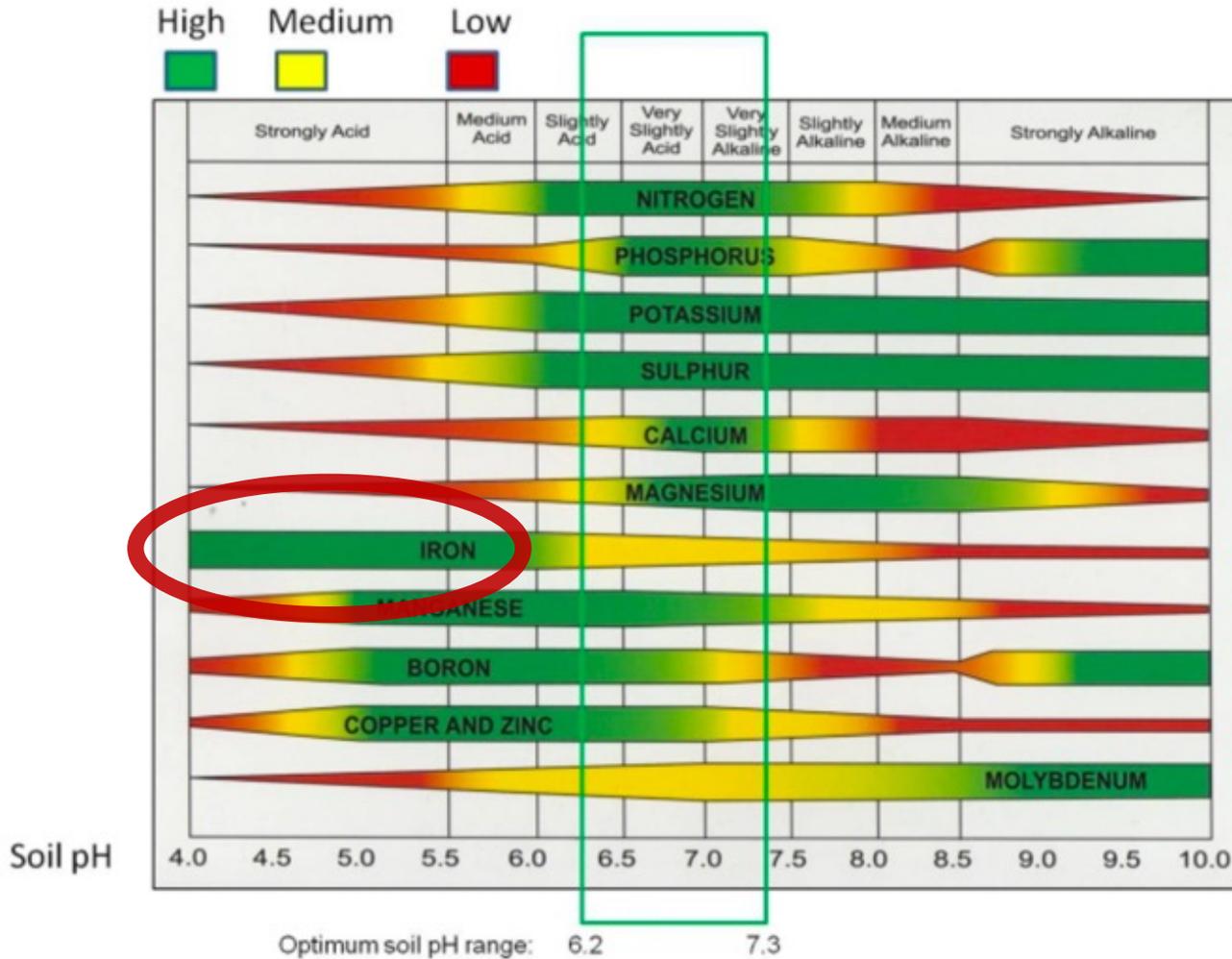
Neutralité électrique:  $pe+pH=14$  ( $rH_2=28$ )

Une multitude de processus chimico-physiques et biologiques sont conditionnés par, ou impactent, ces conditions pH-Eh (-CE-temp)

Utiliser ces diagrammes pH-Eh comme « arrière-plan » pour comprendre ces processus, montrer l'omniprésence des microorganismes dans une approche « santé unique »

# Les conditions Eh-pH des sols impactent la nutrition et l'homéostasie Eh-pH des plantes ⇔ Plantes+microorganismes modifient Eh-pH du sol

How soil pH affects availability of plant nutrients



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

t= [F

# Perspective « Eh-pH et CE » pour la compréhension des processus: « l'arrière plan »

The RYMV-Encoded Viral Suppressor of RNA Silencing P1 Is a Zinc-Binding Protein with Redox-Dependent Flexibility

François-Xavier Gillet<sup>1</sup>, Diego Ignacio Cattoni<sup>2</sup>, Stéphanie Petit-Bécard<sup>3</sup>, François Delalande<sup>3</sup>, Vianney Poignavet<sup>1</sup>, Jean-Paul Brizard<sup>1</sup>, Yannick Bessin<sup>2</sup>, Alain Van Dorsselae<sup>3</sup>, Nathalie Declerck<sup>3</sup>, Sarah Sanglier-Cianferani<sup>3</sup>, Christophe Brugidou<sup>1</sup> and Florence Vignols<sup>1</sup>

Interactions plantes-pathogènes et physiologie

=> Pré transcription: Blocage des messagers. P1: oligomérisation par oxydation

=> Post transcription: Redox switch (thiols): active/désactive les protéines

=> Epigénétique: Acétylation (oxydation); méthylation (réduction), ARN non codant

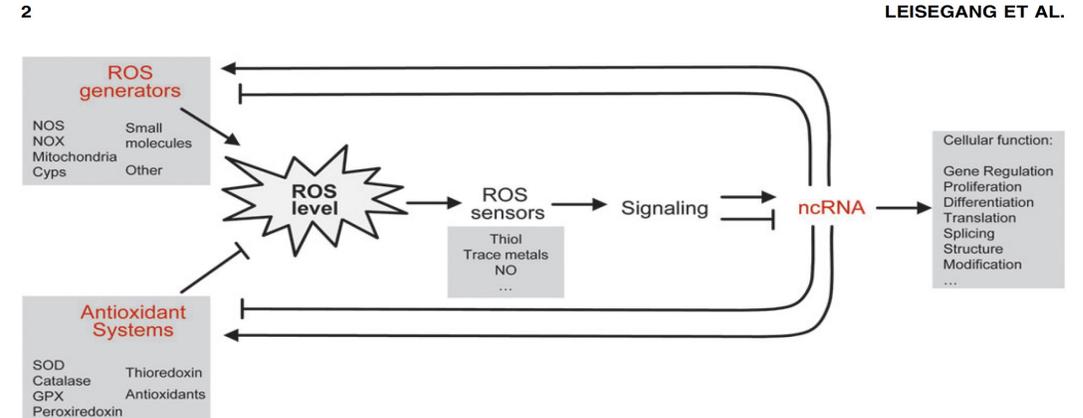
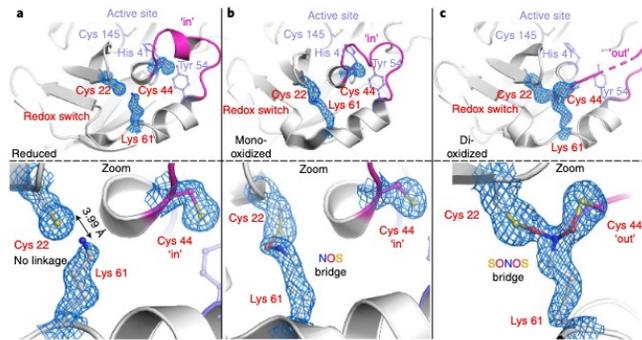


FIG. 1. Interplay of redox regulation and ncRNAs. ROS levels increased by ROS generators (arrow) or decreased by antioxidant systems (blocking symbol) are not only recognized by ROS sensors triggering signal responses with effects on ncRNAs but also ncRNAs themselves influence ROS generators or antioxidant systems, thereby affecting key cellular functions. Cyps, cytochrome P450; GPX, glutathione peroxidase; NO, nitric oxide; NOS, nitric oxide synthase; NOX, NAPDH oxidase; ROS, reactive oxygen species; SOD, superoxide dismutase.

FORUM REVIEW ARTICLE

Redox Regulation and Noncoding RNAs

Matthias S. Leisegang<sup>1,2</sup> Katrin Schröder<sup>1,2</sup> and Ralf P. Brandes<sup>1,2</sup>

etc.

=> Maintien de l'immunité: demande de l'énergie

Review

## NPR1 and Redox Rhythmx: Connections, between Circadian Clock and Plant Immunity

Jingjing Zhang<sup>1,2</sup>, Ziyu Ren<sup>1,2</sup>, Yuqing Zhou<sup>1,2</sup>, Zheng Ma<sup>1,2,3</sup>, Yanqin Ma<sup>1,2,3</sup>, Dairu Hou<sup>1,2</sup>, Ziqin Xu<sup>1,2,3</sup> and Xuan Huang<sup>1,2,3,\*</sup>

Cell, Vol. 113, 935–944, June 27, 2003, Copyright ©2003 by Cell Press

## Inducers of Plant Systemic Acquired Resistance Regulate NPR1 Function through Redox Changes

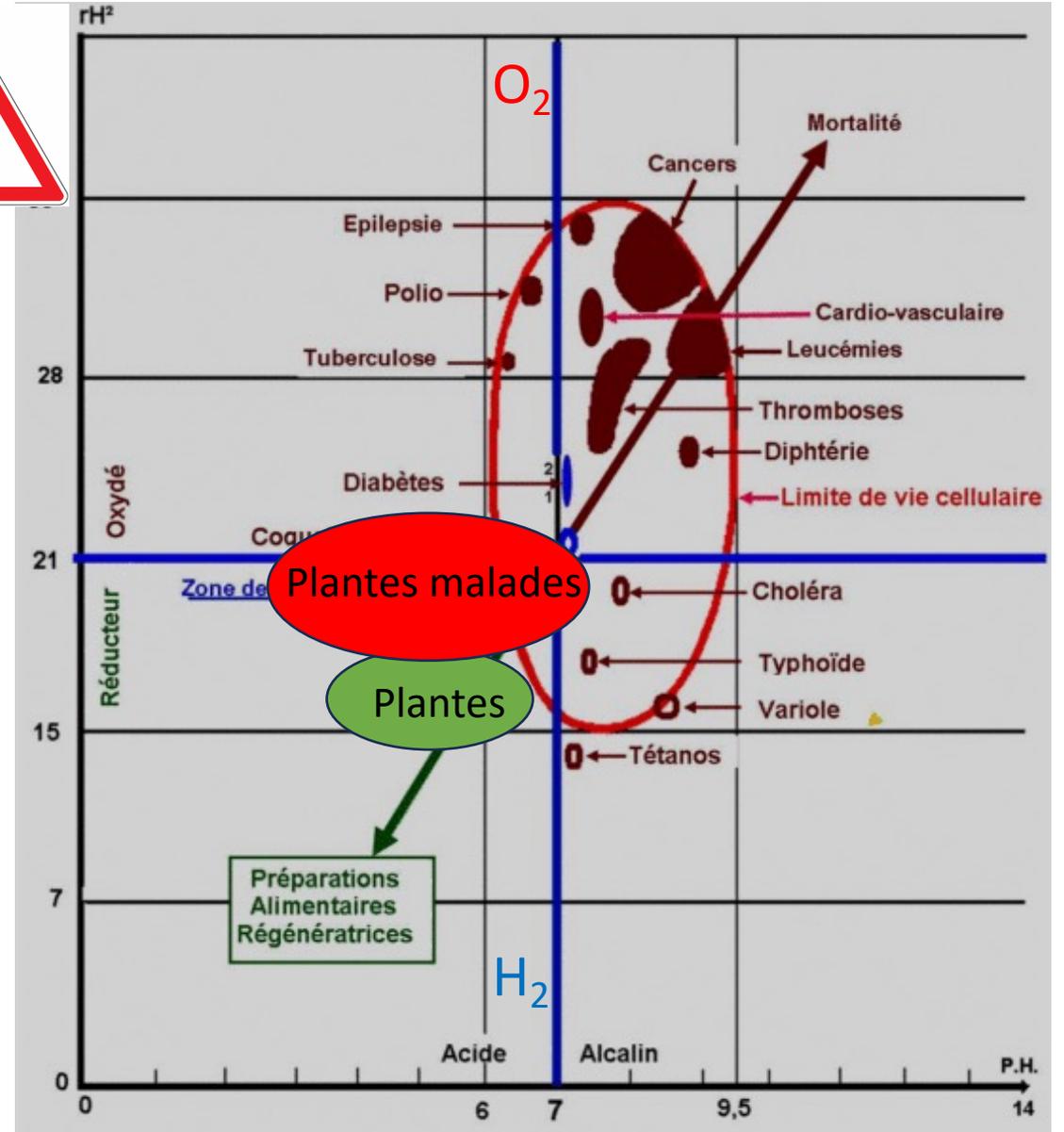
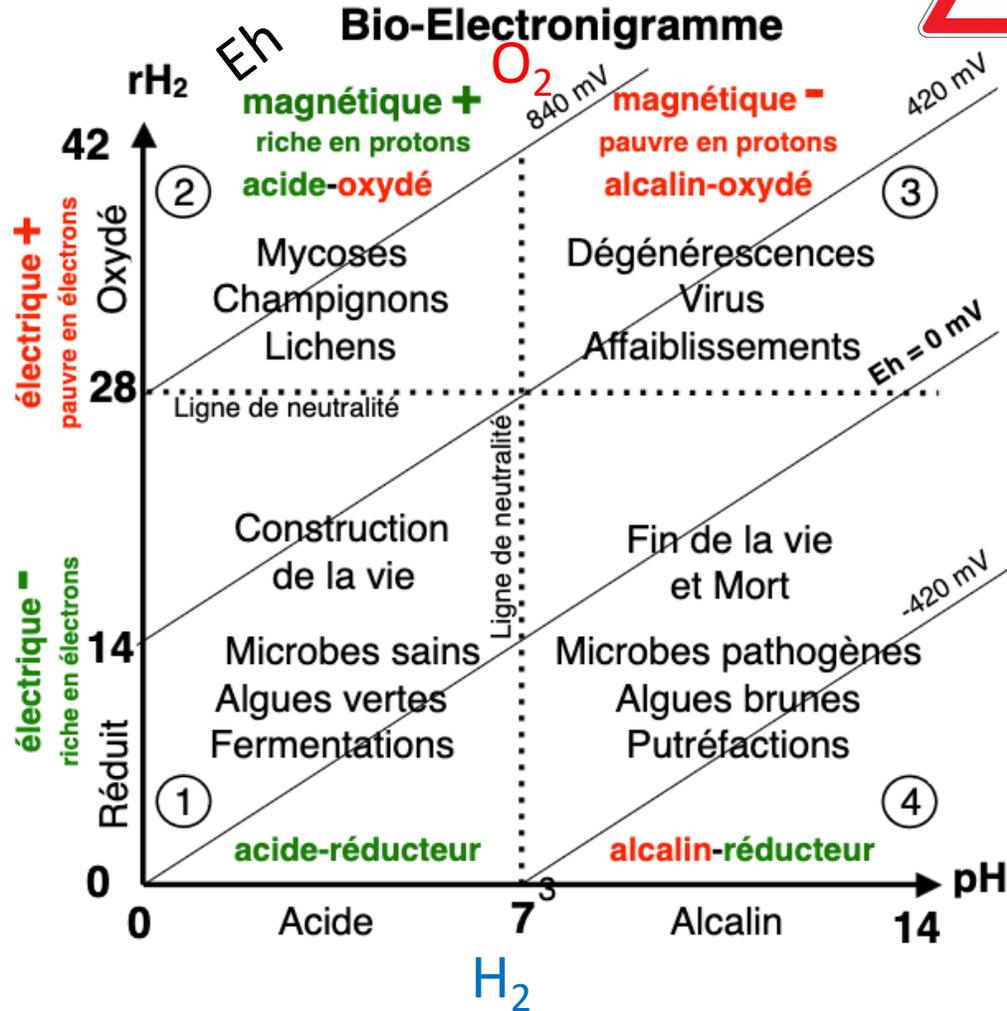
Zhonglin Mou, Weihua Fan,<sup>1</sup> and Xinnian Dong\*

or its biologically active analogs, such as 2,6-dich



# Perspective « Eh-pH et CE » pour la compréhension des processus: « l'arrière plan »

Les pathogènes sont souvent adaptés à une gamme « pH-Eh-CE » très étroite



# Un modèle de fonctionnement du vivant simple et élégant

Quelques principes très simples: les pathogènes se développent quand ils rencontrent des conditions de milieu qui leurs sont favorables (notion de « terrain » : pH-Eh-CE)

Un fonctionnement extrêmement complexe, spatialisé et dynamique

Spatialisation (compartimentation) et régulation dynamique à différentes échelles

Switchs redox, signaux, réseaux redox très complexes, fluctuations => notion de « tampon »

ANTIOXIDANTS & REDOX SIGNALING  
Volume 23, Number 9, 2015  
DOI: 10.1089/ars.2015.6247

REVIEW ARTICLE

The Redox Code

Dean P. Jones<sup>1</sup> and Helmut Sies<sup>2,3</sup>

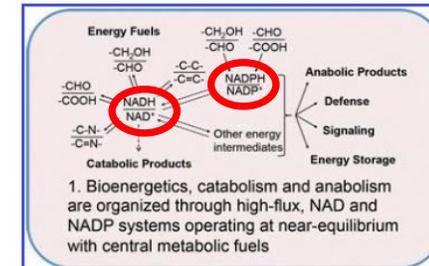
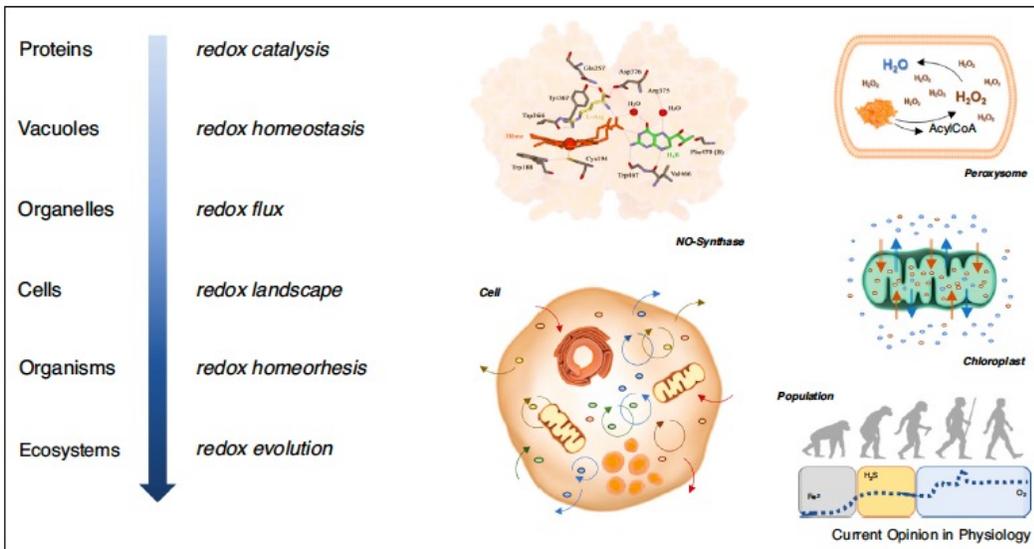


FIG. 1. The redox code. The four principles of the redox code by which biological systems are organized (see text).



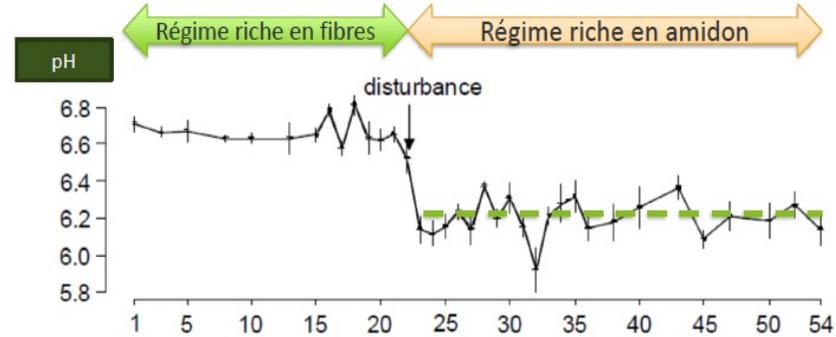
Santolini et al. 2019. The redox architecture of physiological functions

La régulation du pH demande de faire tourner des pompes protons-ATP qui consomment de l'énergie et oxydant



## Le pH, mais pas seulement...

👁️ Un exemple sur une transition rapide, chez des génisses....



Le pH est stabilisé, mais Eh continue à monter

Christine Julien



Quand le pH « dérape », c'est que l'oxydation est assez avancée

# Impacts des pratiques/systèmes agricoles sur Eh-pH

## Régulation pH: pH du sol et croissance des plantes



### Feuilles

Poids frais

-12%                      -5%                      100%                      -17%

Poids sec

-7%                      =                      100%                      -6%

### Racines

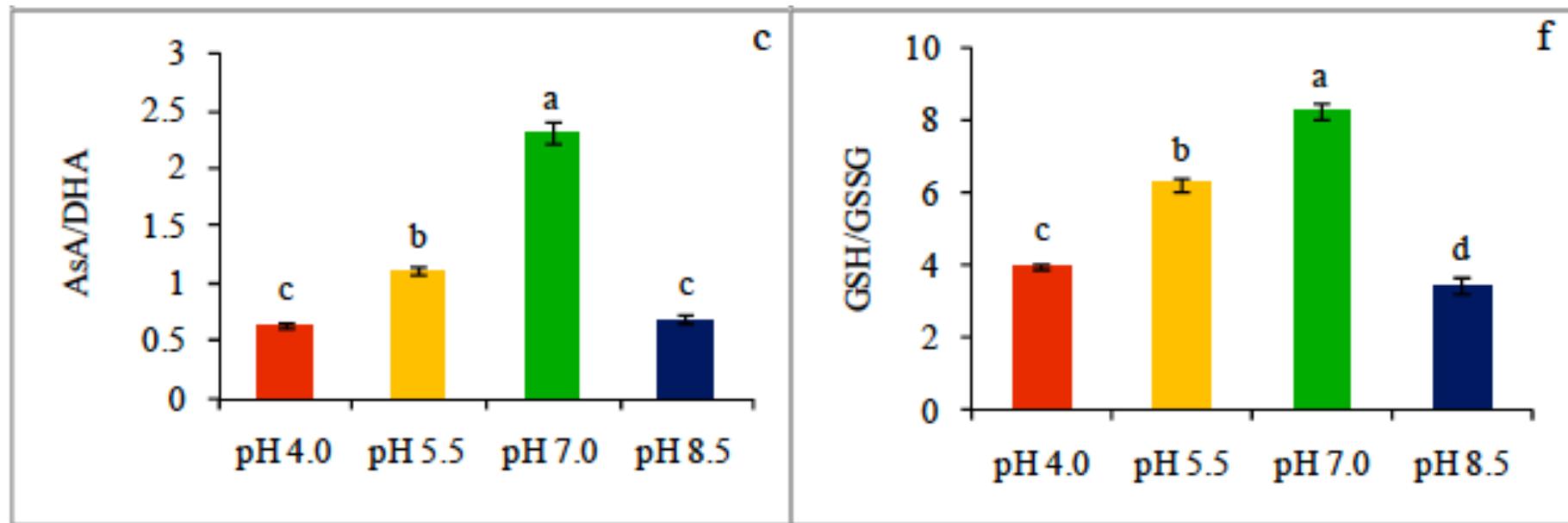
Poids sec

-35%                      -6%                      100%                      -32%

Bhuyan et al,  
2019, sur blé

# Impacts des pratiques/systèmes agricoles sur Eh-pH

## pH du sol et oxydation des plantes



La régulation du pH (et pas que!) se fait par des pompes  $H^+$  - ATP qui consomment de l'énergie (oxydation)

Figure 4. AsA (a) and DHA (b) contents, AsA/DHA ratio (c), GSH (d) and GSSG (e) contents, and GSH/GSSG ratio (f) of wheat leaves under different levels of pH. Mean ( $\pm$ SD) was computed from three replications of each treatment. Bars with dissimilar letters are significantly different at  $p \leq 0.05$  from Fisher's LSD test.

Jhuyan et al, 2019, sur blé



# La photosynthèse : la réduction primaire

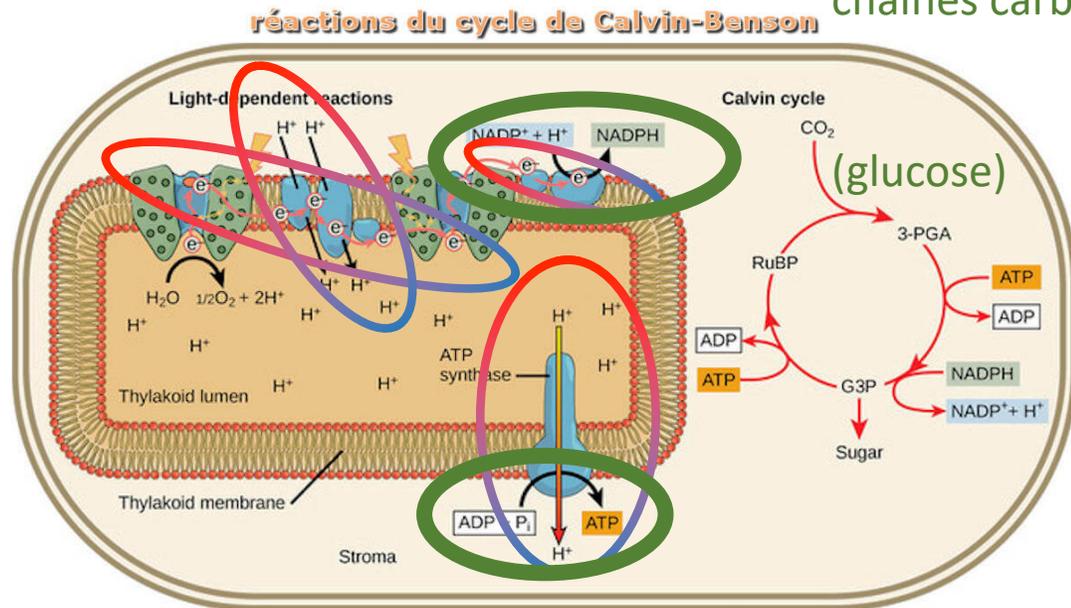
Toute l'énergie du système vient de la photosynthèse



Energie lumineuse  
=> énergie électrique  
e<sup>-</sup> et H<sup>+</sup>

Energie électrique  
=>

Energie chimique  
(ATP-NADPH)  
Energie stockée dans des chaînes carbonées (H)



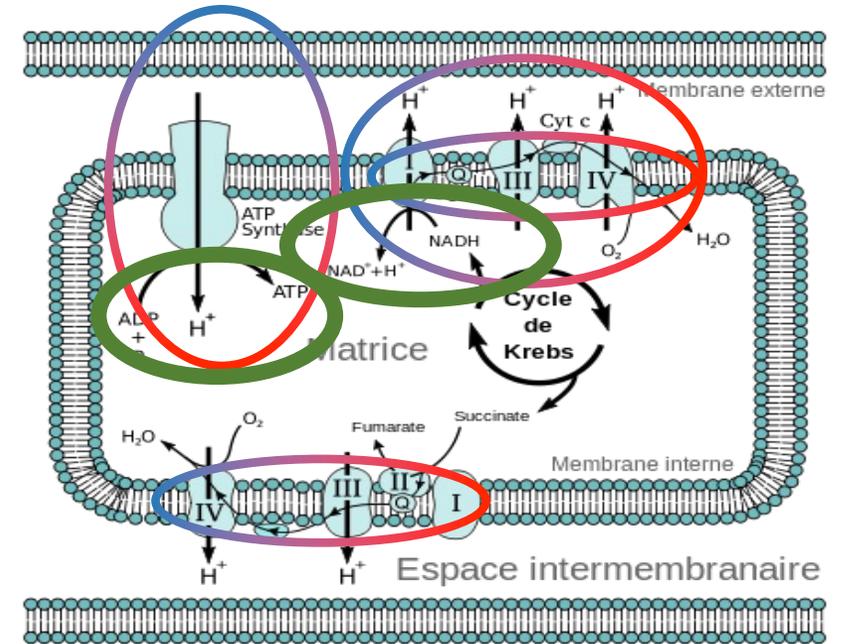
Chloroplaste

gnu - www.aquaportail.com

Plante =  
pile à  
hydrogène



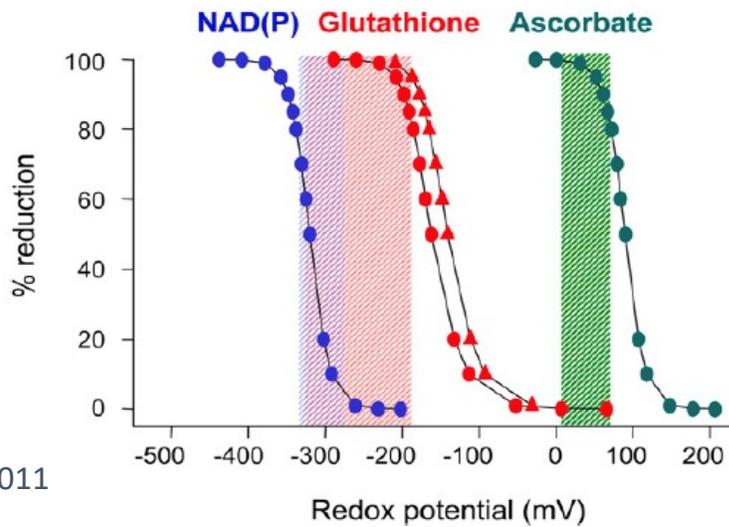
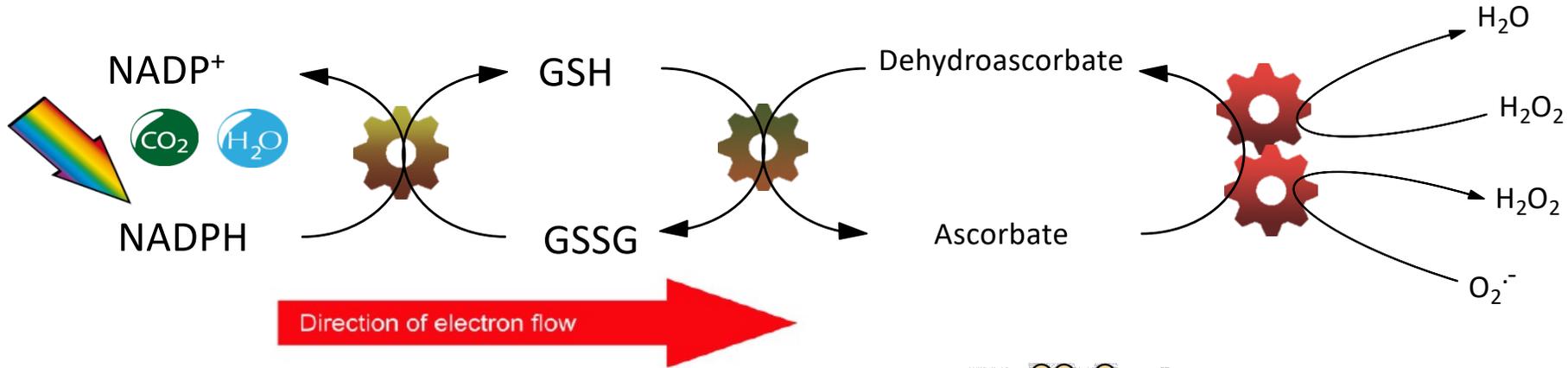
La respiration: l'inverse  
utilisation de l'énergie par oxydation



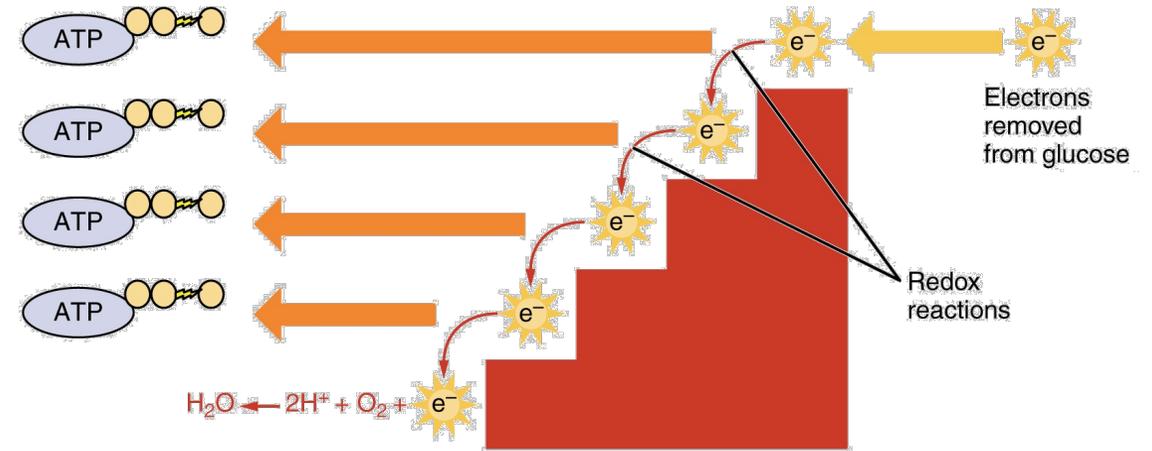
Mitochondrie

# “Roues redox” dans les cellules

Roues redox (e<sup>-</sup>) et H<sup>+</sup>, transferts d'énergie par étapes (petite quantité d'énergie à chaque fois)



Foyer & Noctor 2011



Respiration: utilisation de l'énergie par paliers

Antioxydants pour contrer les effets négatifs de l'oxydation liée au métabolisme/respiration

## Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy

Olivier Husson

Plant Soil  
<https://doi.org/10.1007/s11104-021-05047-z>



## Soil and plant health in relation to dynamic sustainment of Eh and pH homeostasis: A review

Olivier Husson · Jean-Pierre Sarthou · Lydia Bousset · Alain Ratnadass · Hans-Peter Schmidt · John Kempf · Benoit Husson · Sophie Tingry · Jean-Noël Aubertot · Jean-Philippe Deguine · François-Régis Goebel · Jay Ram Lamichhane

Animal 16 (2022) 100543

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)



Animal  
 The international journal of animal biosciences



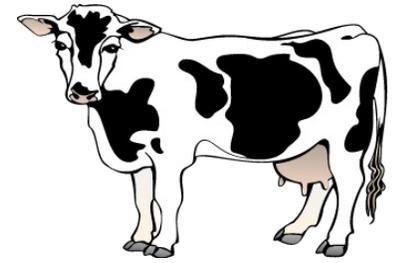
Review: Implication of redox imbalance in animal health and performance at critical periods, insights from different farm species

D. Durand <sup>a,\*</sup>, A. Collin <sup>b</sup>, E. Merlot <sup>c</sup>, E. Baéza <sup>b</sup>, L.A. Guilloteau <sup>b</sup>, N. Le Floc'h <sup>c</sup>, A. Thomas <sup>a</sup>, S. Fontagné-Dicharry <sup>d</sup>, F. Gondret <sup>c</sup>

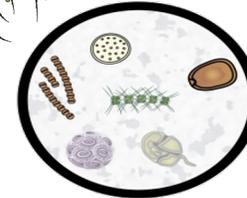
Plantes



Animaux



Tube digestif = racine invaginée



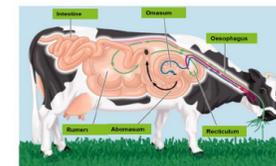
C'est le microbiote qui « digère », solubilise les éléments nutritifs

Absorption sur larges surfaces d'échanges (villosités, etc.)



Nourrir une vache

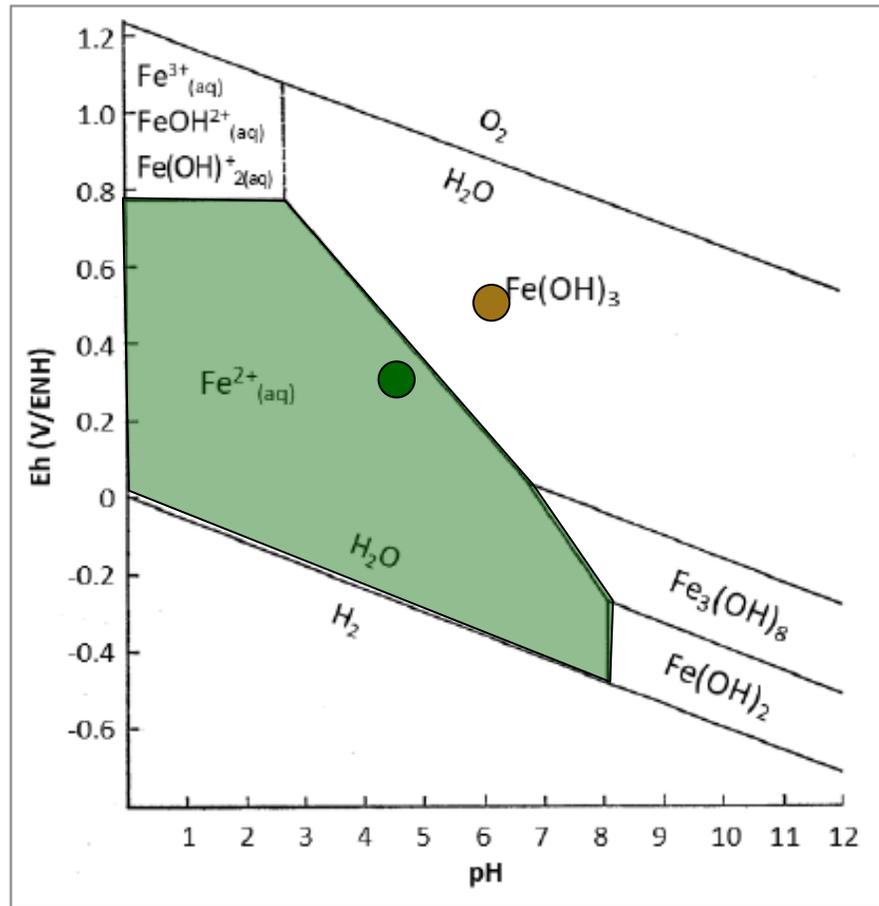
... c'est nourrir son microbiote!



Bacteria	Anaerobic Fungi	Ciliate Protozoa	Methanogenic Archaea
~500 species 10 <sup>10</sup> à 10 <sup>11</sup> cells/g	~30 species 10 <sup>2</sup> à 10 <sup>4</sup> zoospores/g	~40 species 10 <sup>3</sup> à 10 <sup>6</sup> cells/ml	~6 species 10 <sup>8</sup> to 10 <sup>10</sup> cells/g



# Les conditions Eh-pH des sols impactent la nutrition et l'homéostasie Eh-pH des plantes ⇔ Plantes+microorganismes modifient Eh-pH du sol



t=25°C  
[Fe]= 10<sup>-6</sup>mol.l<sup>-1</sup>

Diagramme de Pourbaix du fer tracé par Ponnamperuma et al. (1967).  
Fe(OH)<sub>3</sub> - Fe<sub>3</sub>(OH)<sub>8</sub> - Fe<sup>2+</sup>

Diagramme de Pourbaix

Coût énergétique!

Effet « boule de neige »

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

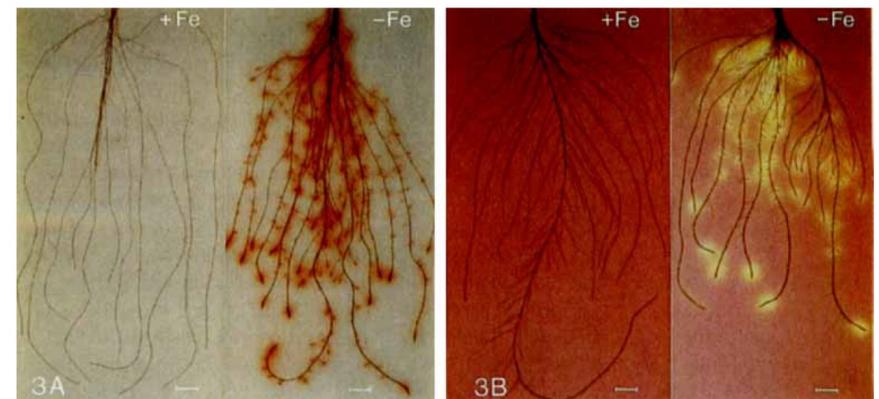


Figure 3: Iron deficiency-induced changes in the rhizosphere of cucumber plants (*Cucumis sativus* L.) (see Marschner et al., 1982 for further details of the method). A – increase in the capacity of roots to reduce Fe<sup>III</sup> by a plasma membrane-bound reductase. Roots were embedded in agar with Fe<sup>III</sup>EDTA and BPDS (4,6-di(4-phenylsulfate)1,10-phenantroline). Left, control plant (Fe sufficient); right, Fe deficient plant with formation of red colored Fe<sup>II</sup>(BPDS)<sub>3</sub> around the apical root zones. B – increase in the capacity of roots to acidify the rhizosphere from enhanced H<sup>+</sup> net extrusion. Roots were embedded in agar with bromocresol purple and a complete nutrient solution at pH 6.0 (N as nitrate was used). Left, control plant (Fe sufficient); right, Fe deficient plant with distinct acidification of the rhizosphere (yellow areas pH 4.0) around apical root zones. Bar = 1 cm.

Marschner et al, 1986

# Eh-pH, solubilité des éléments et nutrition des plantes

La solubilité dans les nutriments et les métaux lourds est liée à la fois à l'Eh et au pH

=> «Gamme» optimale de sol Eh-pH pour la nutrition des plantes

⇒ Risque de carence:

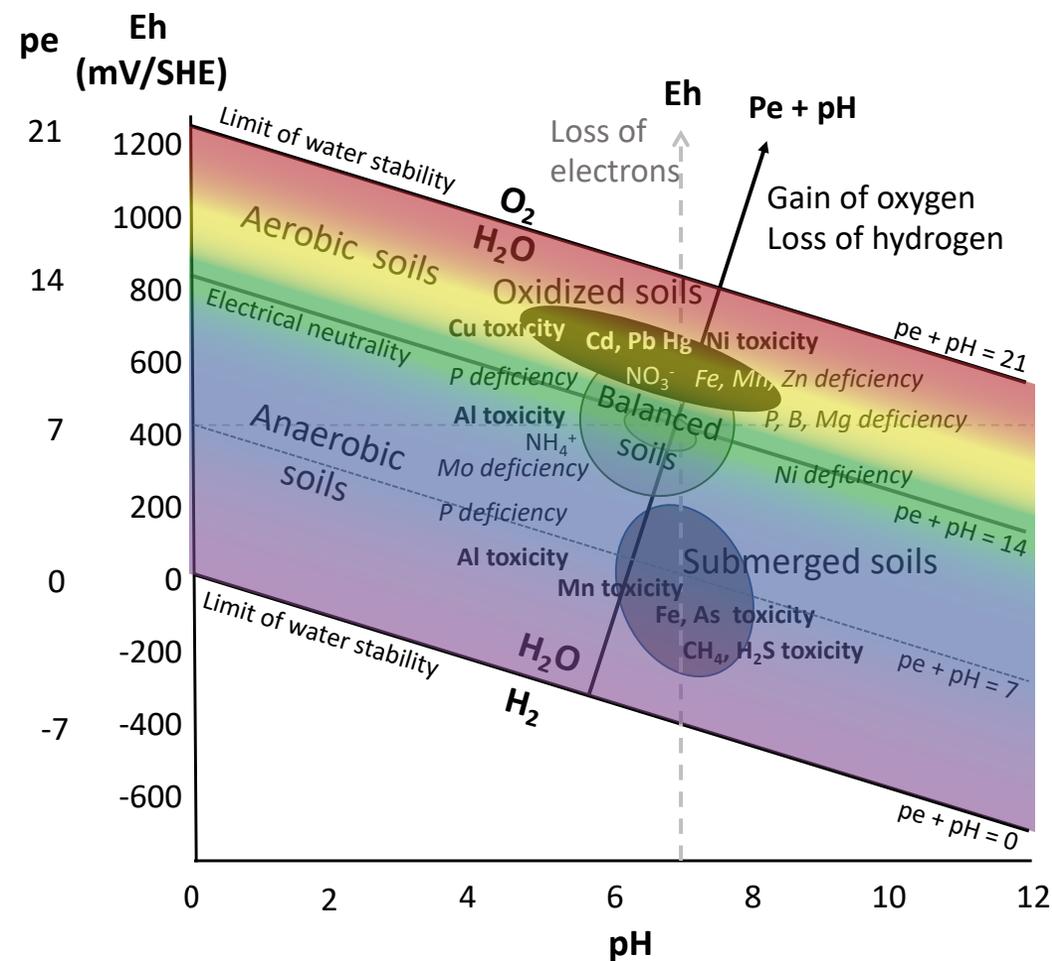
Fe, Mn à  $pe + pH$  élevé

Mo à  $pe + pH$  bas

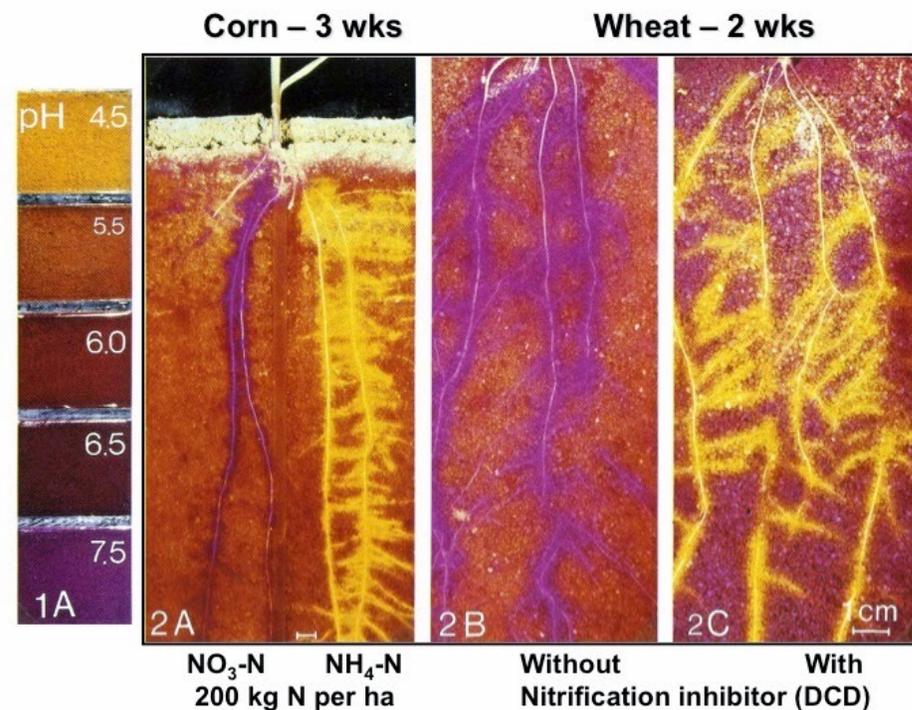
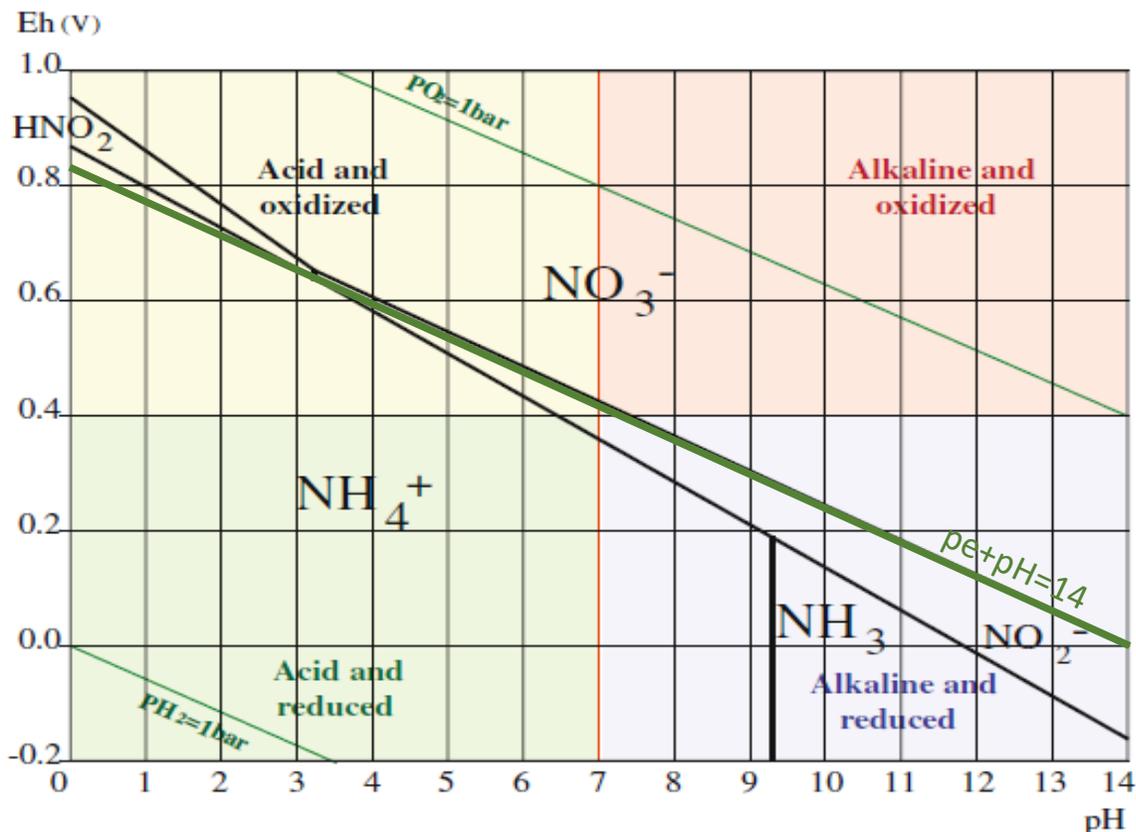
Ca, P (indirectement) à pH bas,  
P, B à pH élevé...

=> Risque de toxicité: Fe, Mn,  
As,  $CH_4$ ,  $H_2S$  à très bas  $pe + pH$ ,  
Al à bas pH

Pb, Cd, Ni, Zn, Hg à haut Eh,...



Les conditions Eh-pH des sols impactent la nutrition et l'homéostasie Eh-pH des plantes ⇔ Plantes+microorganismes modifient Eh-pH du sol



Marschner et al, 1986

Déséquilibre du sol => déséquilibre de la plante (carences induites Fe, Mn en particulier)

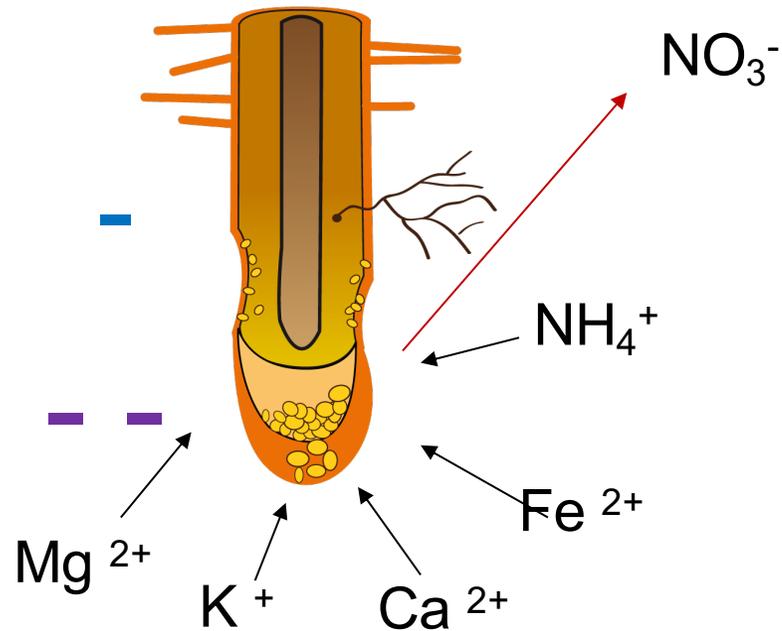
Déséquilibre pH selon la forme d'azote minéral

Cercle vicieux: alcalin=>nitrate=>alcalinise. Acide=>Ammonium=>acidification

# Nutrition azotée des plantes

$\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$  sont assimilables par les plantes, mais...

La forme des éléments (fonction de Eh-pH) impacte leur solubilité et leur absorption



Cercle vicieux: sec=>oxydé=>nitrate=>efficacité de l'eau baisse

Problèmes liés à l'absorption de  $\text{NO}_3^-$  :

Respiration racinaire augmentée de 10-15% pour absorber (et transformer)  $\text{NO}_3^-$  vs  $\text{NH}_4^+$

Augmente le pH du sol: mauvais sur sol alcalin

Coût énergétique pour produire des AA: +15% avec  $\text{NO}_3^-$  (8 électrons par N)

Efficacité de l'eau réduite avec  $\text{NO}_3^-$  (-50% en cas de stress hydrique sur riz)

Impact sur la santé des plantes riches en nitrate

Guo et al Ann Appl Biol 153 (2008) 127-134

Li et al. Advances in agronomy 118 (2013) 205-397

# Nutrition azotée des plantes

$\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$  sont assimilables par les plantes, mais...

## Problèmes liés à l'absorption de $\text{NH}_4^+$ :

Absorption de  $\text{NH}_4^+$  : antagoniste de l'absorption de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  (Cox et al 1973)

Baisse du pH du sol: Sol acide

Taux de  $\text{NH}_4^+$  élevé dans la plante entraîne des toxicités

$\text{NH}_4^+$  n'est pas mobile: coûts énergétiques de prospection élevés

## Problèmes liés à l'absorption de $\text{NO}_3^-$ :

Respiration racinaire augmentée de 10-15% pour absorber (transformer)  $\text{NO}_3^-$  vs  $\text{NH}_4^+$

Augmente le pH du sol: sol alcalin

Coût énergétique pour produire des AA: +15% avec  $\text{NO}_3^-$  (8 électrons par N)

Efficiences de l'eau réduite avec  $\text{NO}_3^-$  (-50% en cas de stress hydrique sur riz)

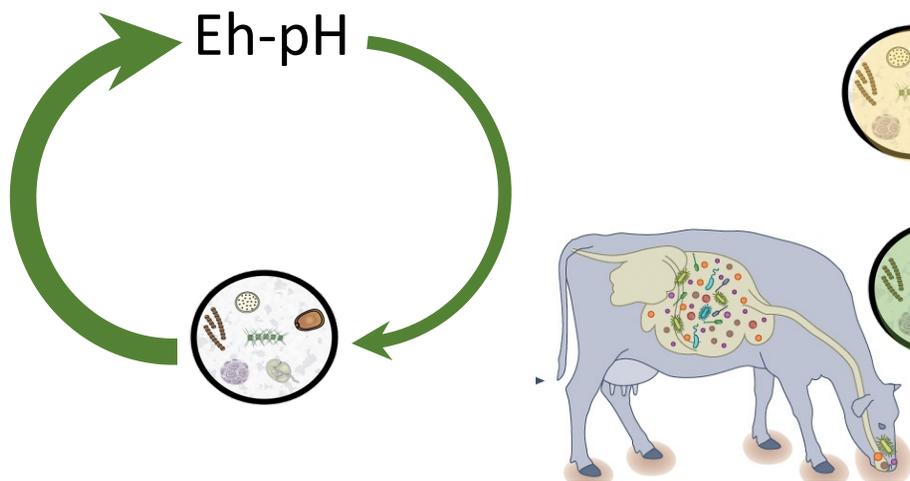
Plantes riches en nitrate et santé

Guo et al Ann Appl Biol 153 (2008) 127-134  
Li et al. Advances in agronomy 118 (2013) 205-397

Les conditions Eh-pH des sols impactent la nutrition et l'homéostasie Eh-pH des plantes ⇔ Plantes+microorganismes modifient Eh-pH du sol

### Les « roues Redox »

Chaque organisme vivant se développe dans des conditions Eh-pH spécifiques



Importance de la structure: diversité de niches pH-Eh

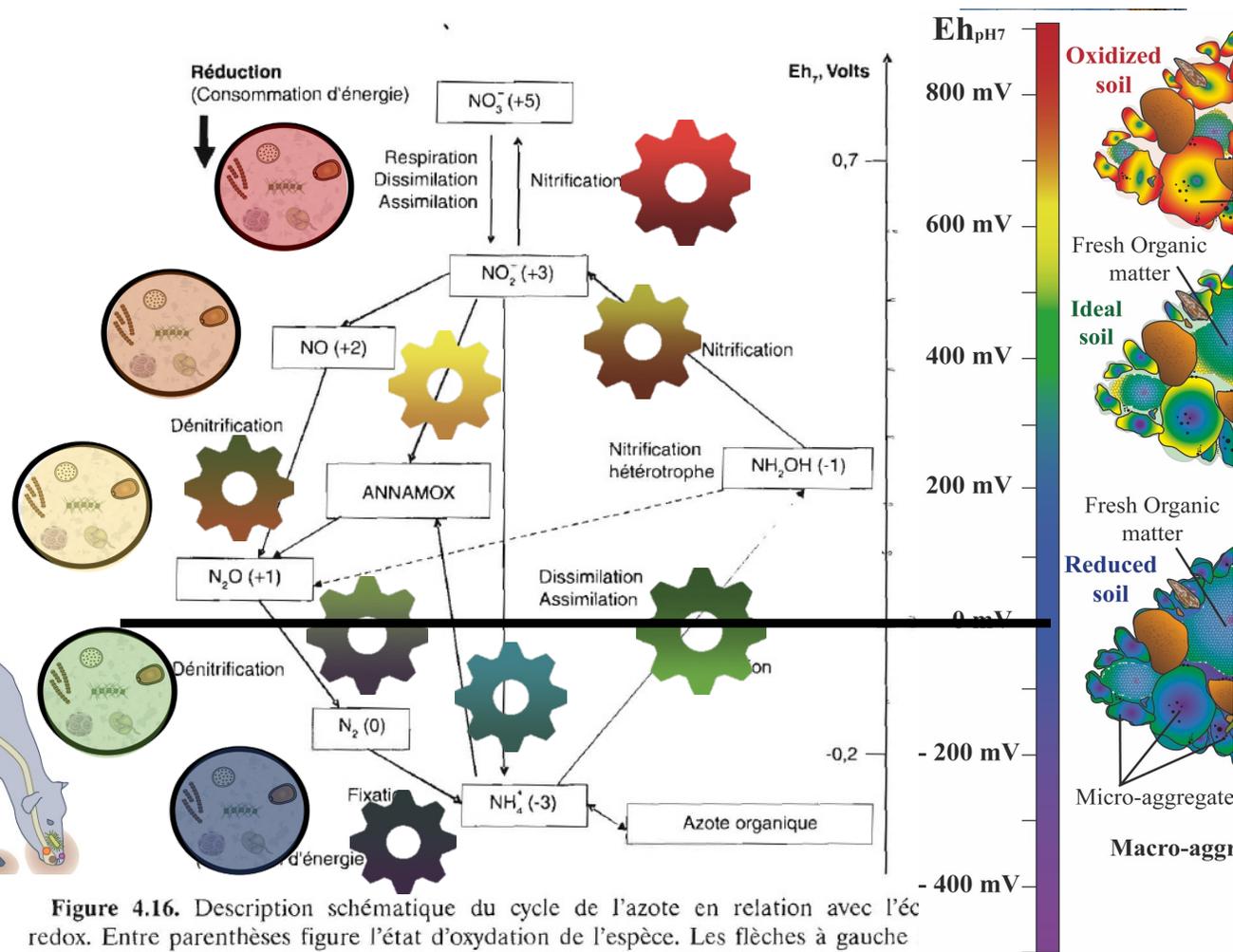
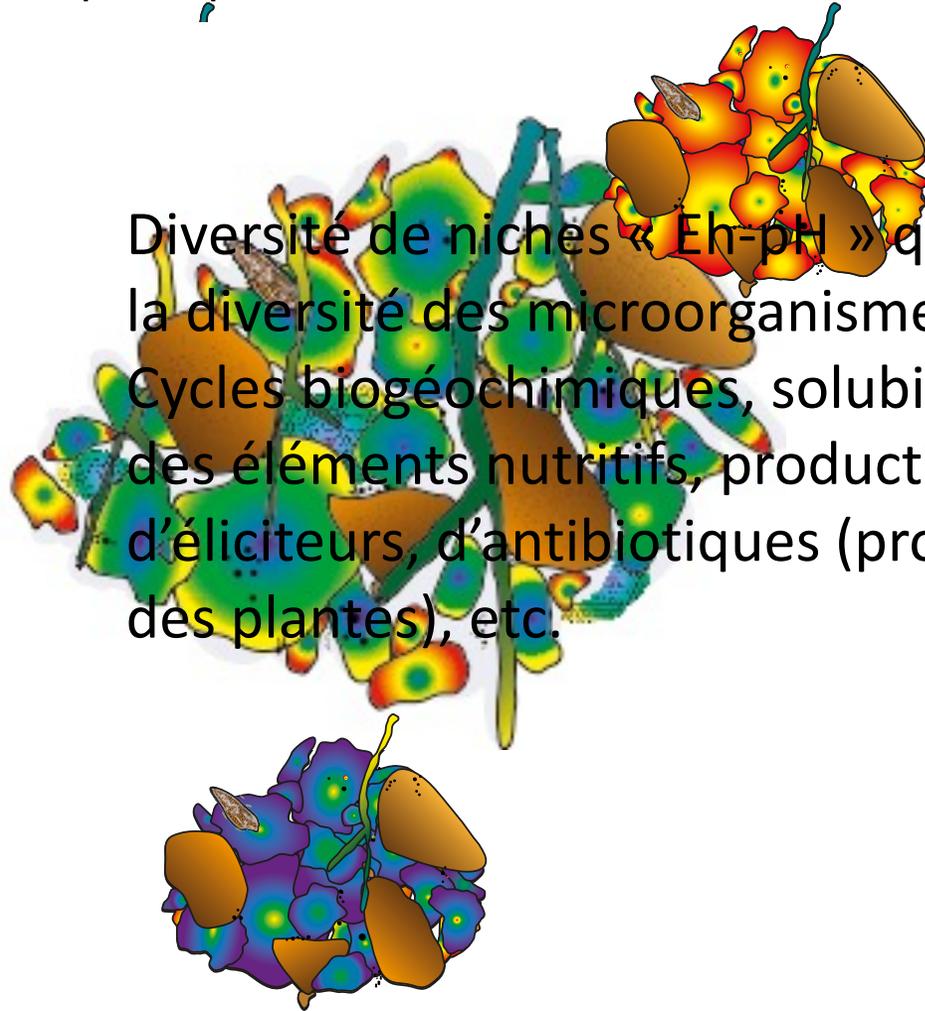
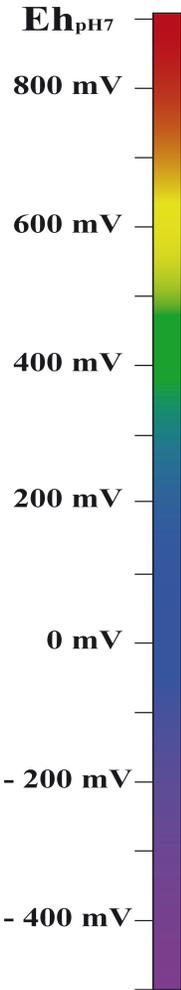


Figure 4.16. Description schématique du cycle de l'azote en relation avec l'éc redox. Entre parenthèses figure l'état d'oxydation de l'espèce. Les flèches à gauche figure indiquent le sens des processus de réduction et d'oxydation. D'après McBride, 1994 ; Richardson, 2000. ANAMMOX : oxydation anaérobie de l'ammonium (*Anaerobic Ammonium Oxydation*). Pidello, 2014. Principes de chimie redox en écologie microbienne. Editions Quae. 25 144 p.

# Importance fondamentale de la structure dans la régulation redox

Eh-pH dépendent avant tout de la structure

Eh-pH du sol dépendent de la matière organique (labile : réservoir d'électron et stable: capacité tampon), de l'activité biologique et de l'argile du sol



Diversité de niches « Eh-pH » qui permet la diversité des microorganismes utiles: Cycles biogéochimiques, solubilisation des éléments nutritifs, production d'éliciteurs, d'antibiotiques (protection des plantes), etc.



Pas de sol sain sans plantes!

Toute l'énergie du système vient de la photosynthèse!

Augmentation de la production



Photosynthèse

Photosynthèse améliorée

Microbiote de la phyllosphère  
Niches Eh-pH

Apports de micro-organismes

Apports de biomasse  
Forte biodiversité

Sol dégradé

Forts apports de biomasse

Fortes fluctuations de Eh-pH

Macrofaune

Eh-pH Tamponné

Structure

Forte activité biologique

Microbiote du sol

Nutrition

Opportunistes  
Compétition

Microbiote de la rhizosphère

Santé

Forte biodiversité

Pathogènes > favorables

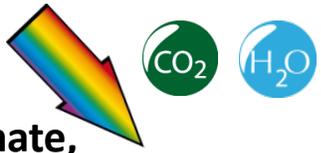
Large gamme de niches Eh-pH

Favorables >> pathogènes

Sol suppressif

# Eh-pH et allocation de l'énergie

Photosynthèse



Climate,  
various stress

Réserve d'énergie  
Anti-oxydants

Parties  
aériennes

Croissance

Racines

Métabolisme

« Correction »  
du milieu

Sol équilibré

Réserve d'énergie (bas pe+pH)  
=> Capacité à tamponner, rééquilibrer,  
résister au stress => santé

Floraison

Sol déséquilibré, stress

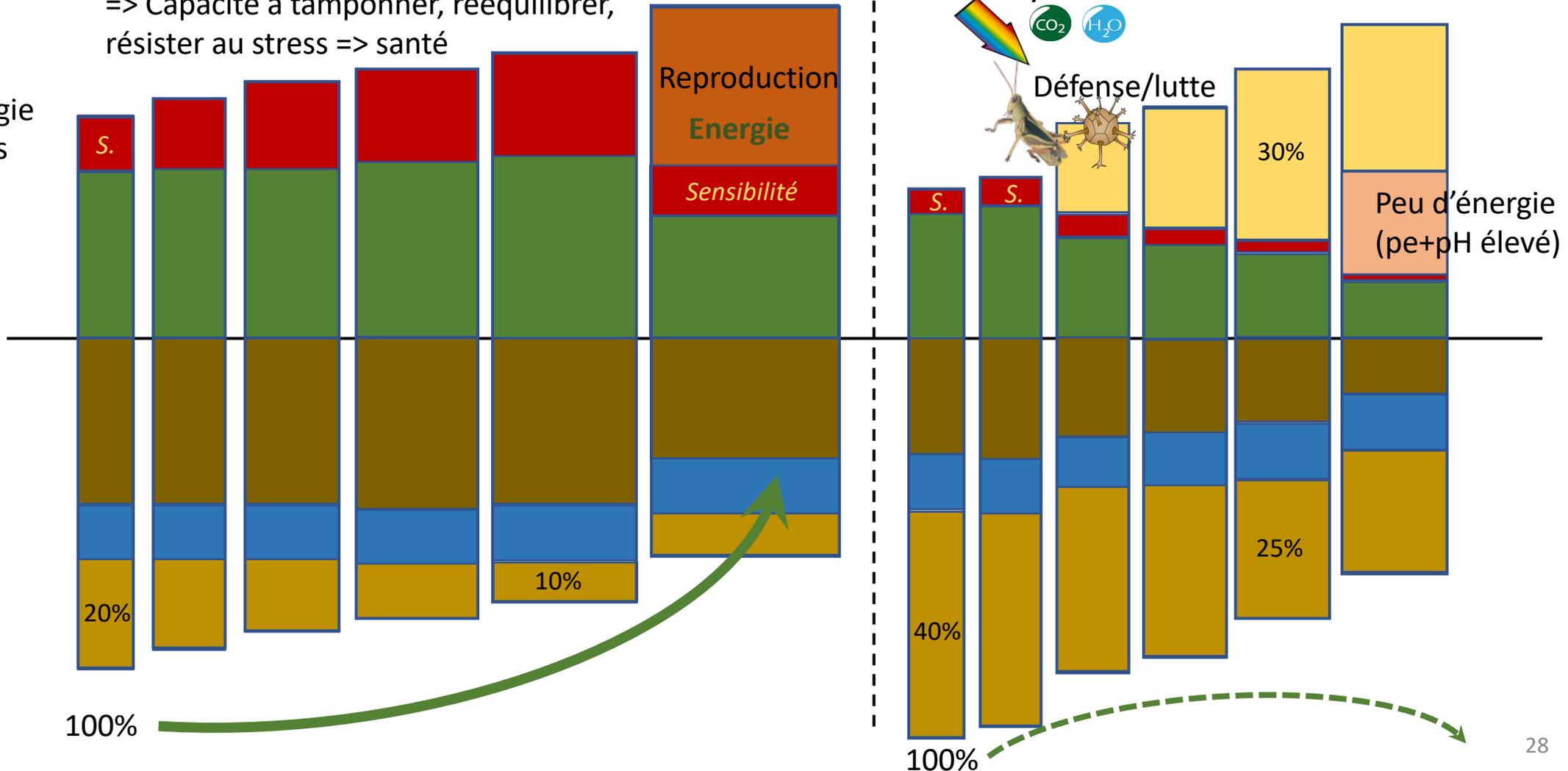
Photosynthèse



Défense/lutte



Floraison

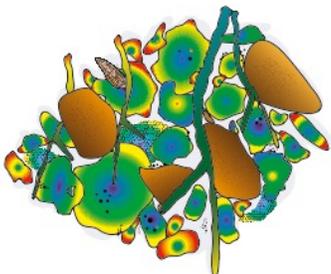
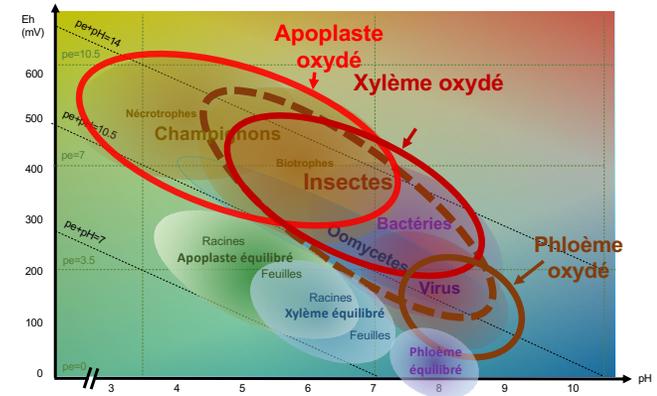


# Un modèle conceptuel très simple

1. Les plantes malades/attaquées sont des plantes oxydées, qui n'arrivent pas à se défendre car elles manquent d'énergie
2. Elles manquent d'énergie car:

- a. La photosynthèse est insuffisante (efficacité- surfaces- durée)
- b. Elles font face à des stress biotiques (bioagresseurs, pratiques culturales) ou abiotiques (climat, carences, toxicités) qui demandent de l'énergie pour maintenir leur équilibre / fonctionnement
- c. Elles sont dans un milieu déséquilibré qui demande de l'énergie pour être rééquilibré (éviter les carences induites et réduire les stress)

- ⇒ Mobilisation des microorganismes et de la méso-macrofaune (habitat-alimentation) : régulation pH-Eh, diversité de niches
- ⇒ Restructuration (régulation/tampon redox-pH-CE; réserve en eau, etc)

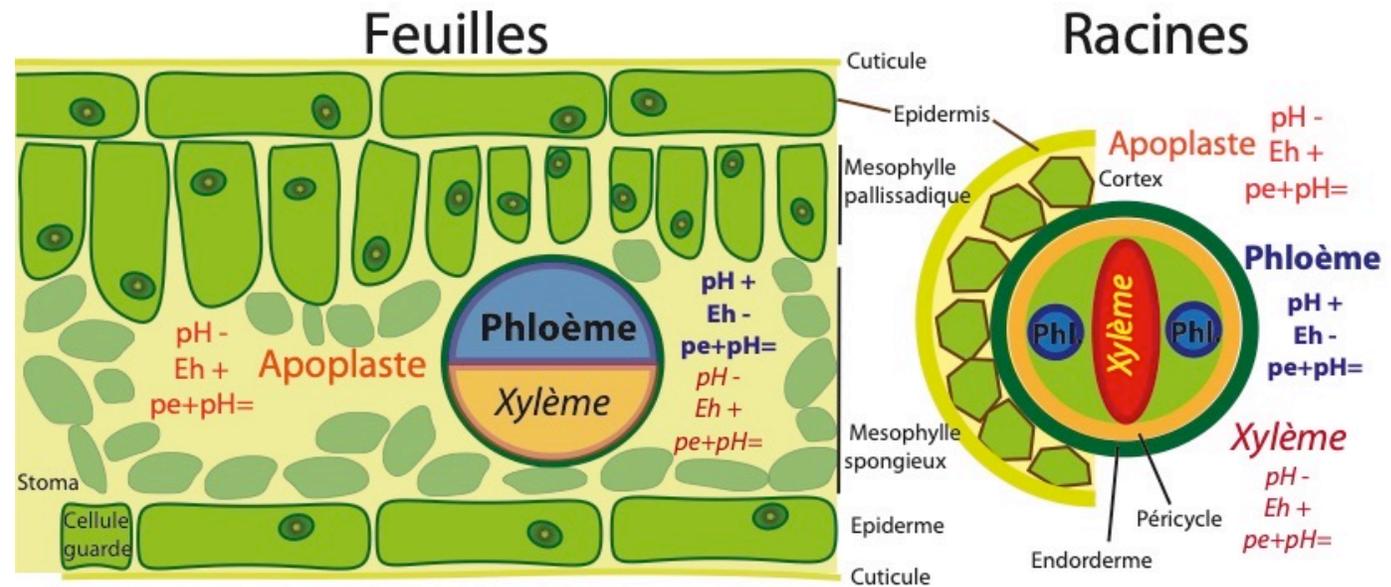


# Eh-pH et plantes: Variabilité spatiale: niches pH-Eh

Les feuilles (lieu de la photosynthèse) sont plus acides et réduites que les racines (ASC/DAH et GSH/GSSG plus bas), Tiges: intermédiaire

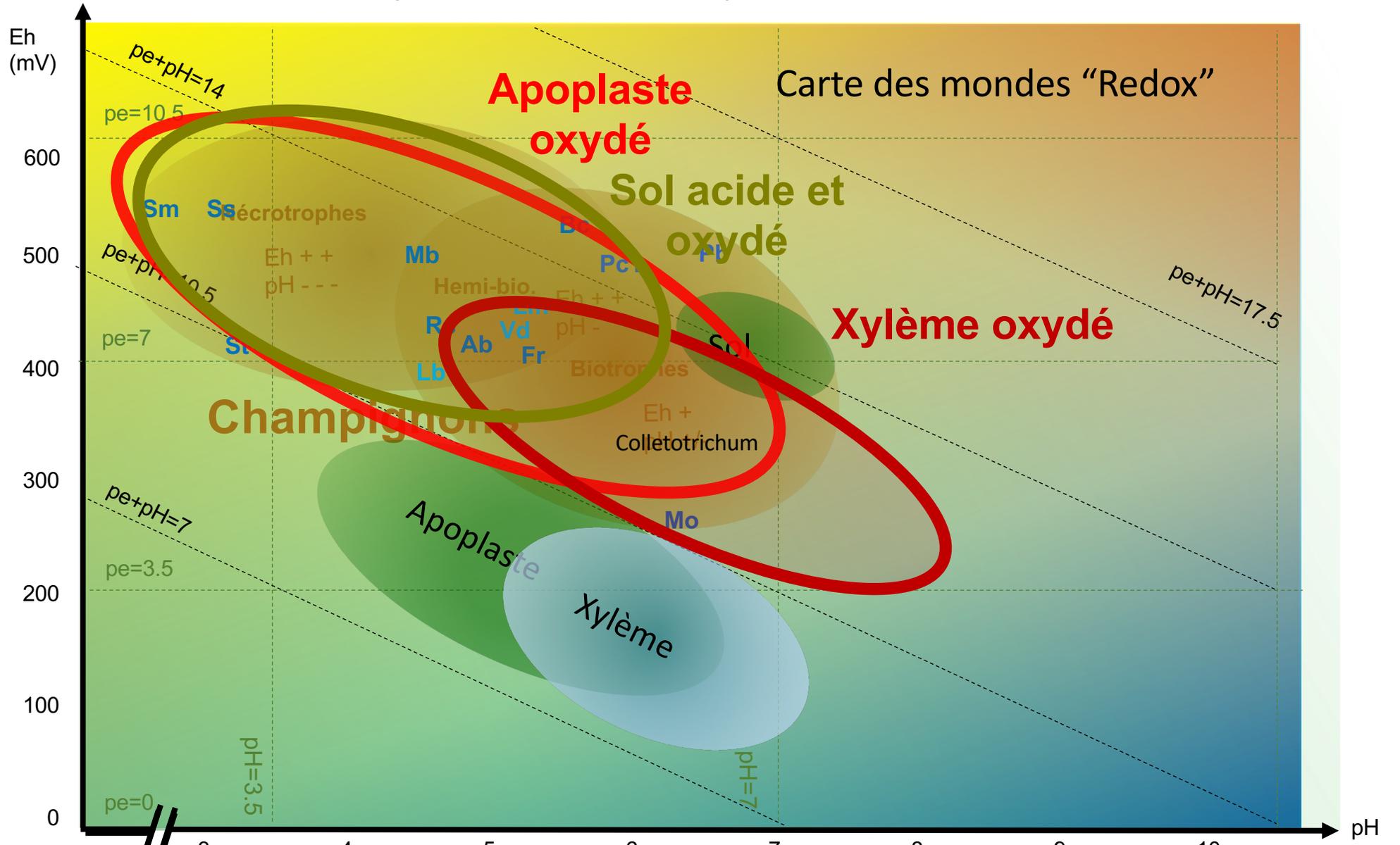
Le phloème est alcalin et réduit, et très régulé: pH 7,5-8,5. maintient d'un gradient de protons pour charger en sucre (pompes sucrose-H<sup>+</sup>). Chargé en sucre, acides aminés et SA (CE élevée)

Le xylème est beaucoup moins tamponné, à pH plus acide (5,0-6,0 et plus oxydé, CE plus basse. Mais fortes variations avec les conditions extérieures

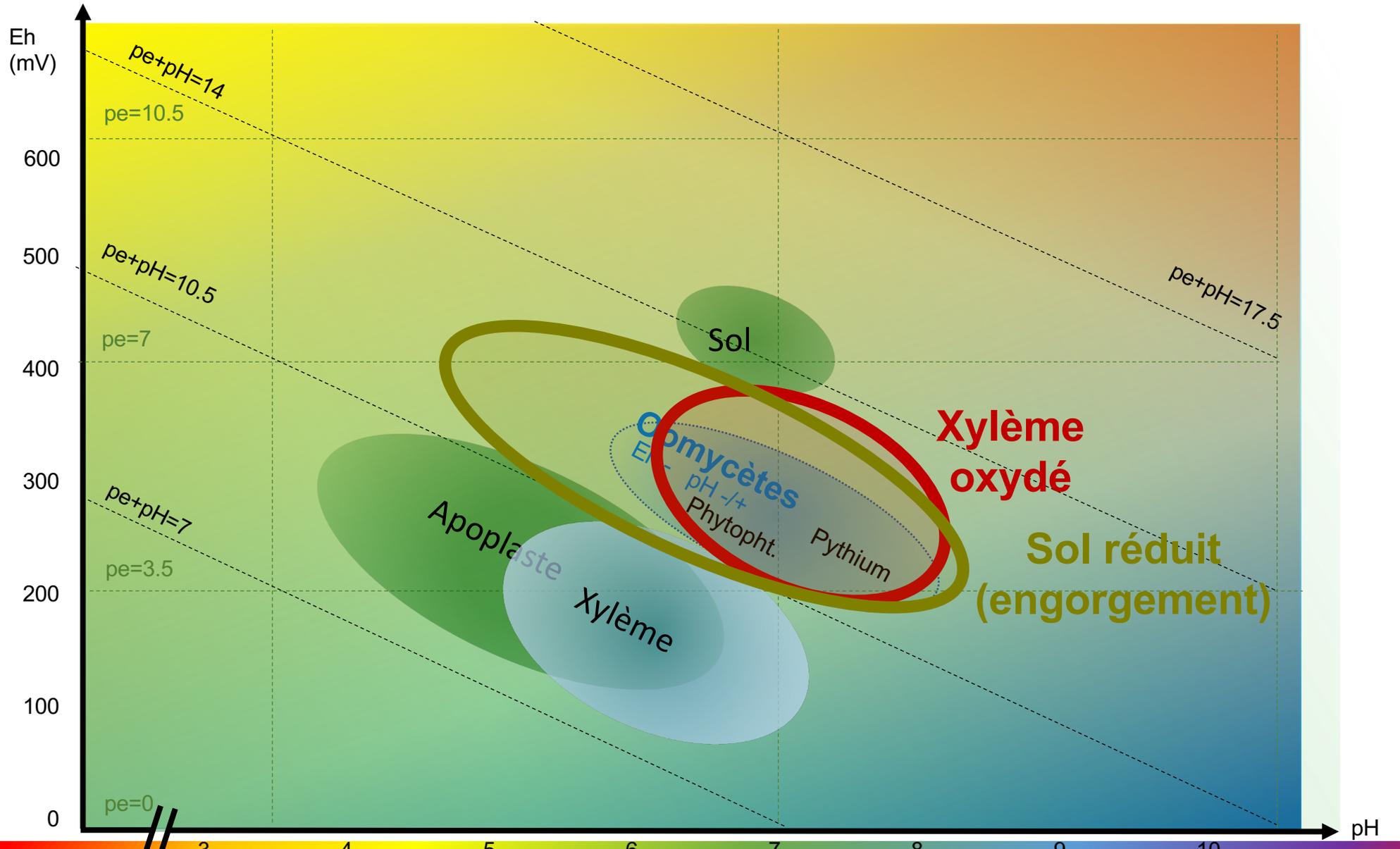


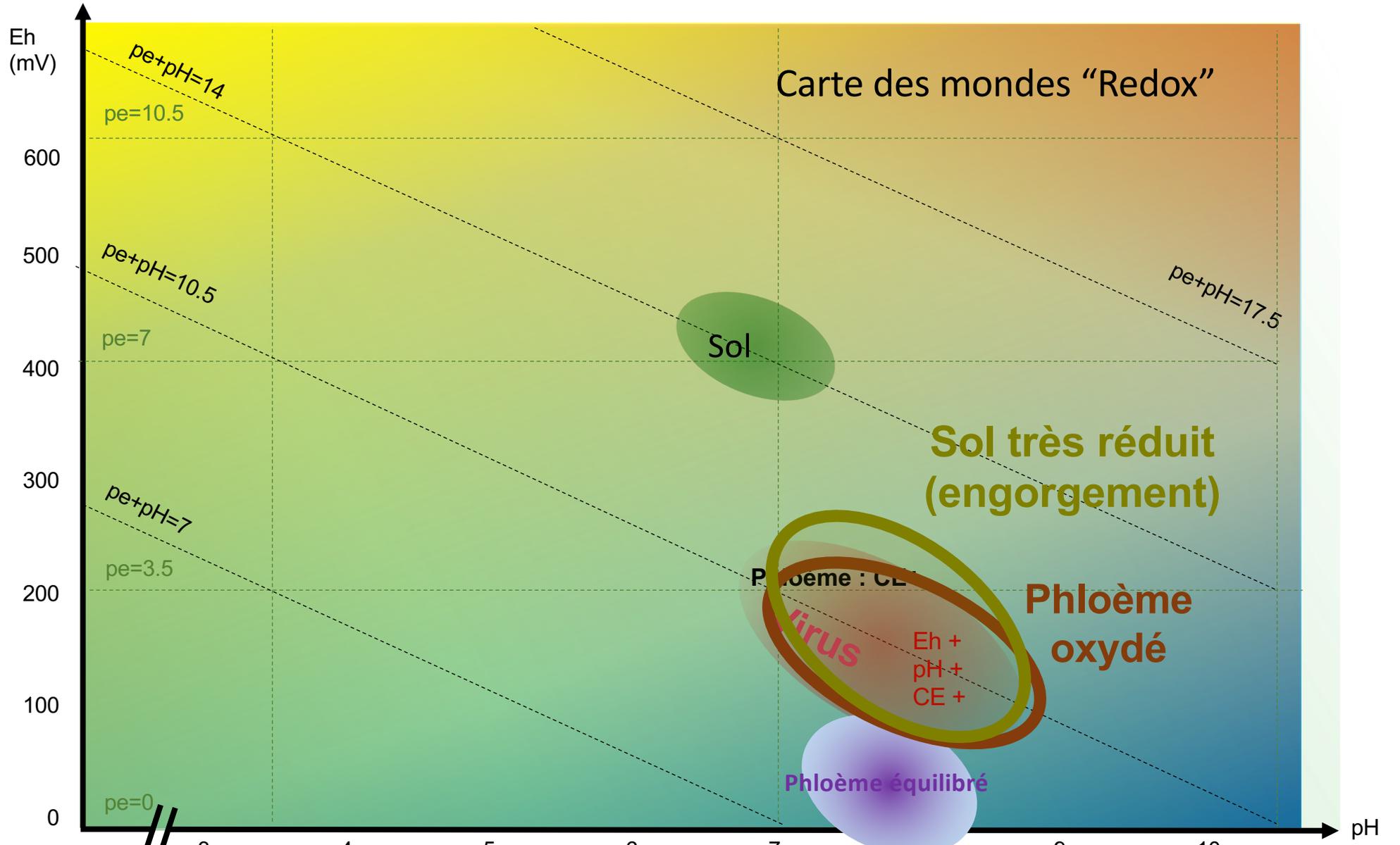
Apoplaste: très peu tamponné (cellule très tamponné, cytoplasme à pH 7,3)

# Eh-pH et santé des plantes

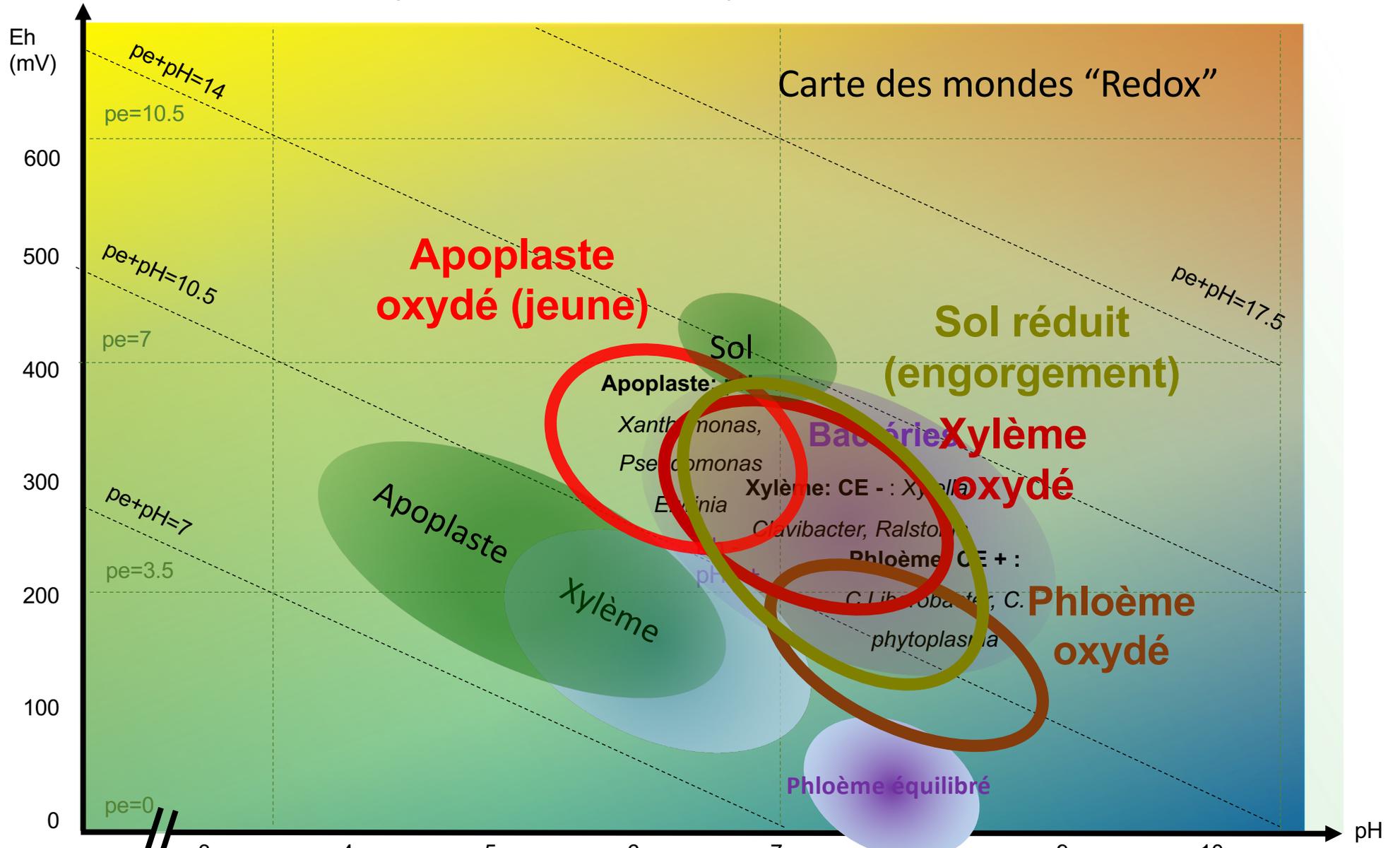


# Eh-pH et santé des plantes





# Eh-pH et santé des plantes



# Eh-pH et santé des plantes

## Redox et insectes

Johnson & Felton, 1996. Potential Influence of Midgut pH and Redox Potential on Protein Utilization in Insect Herbivores. Archives of insect biochemistry and physiology. 32, 85-105

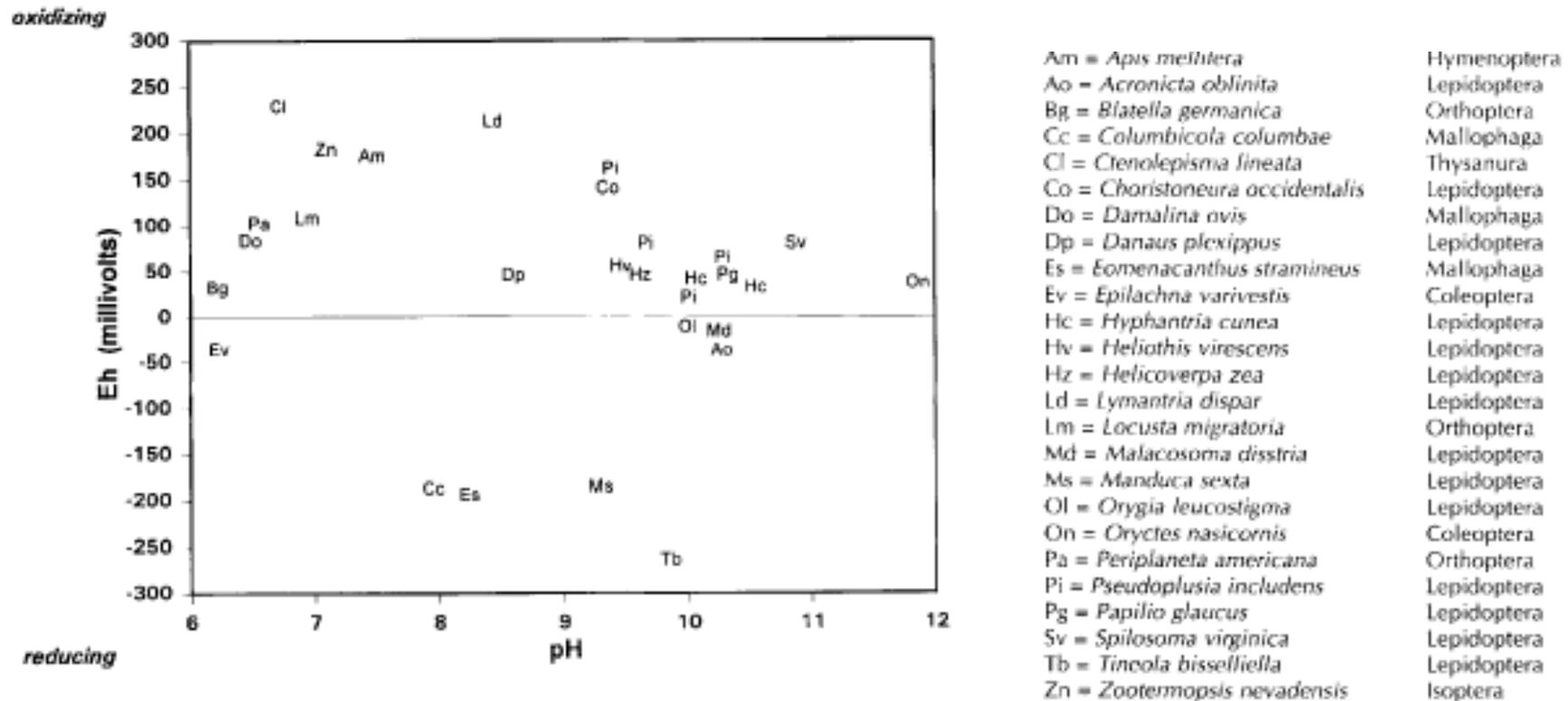


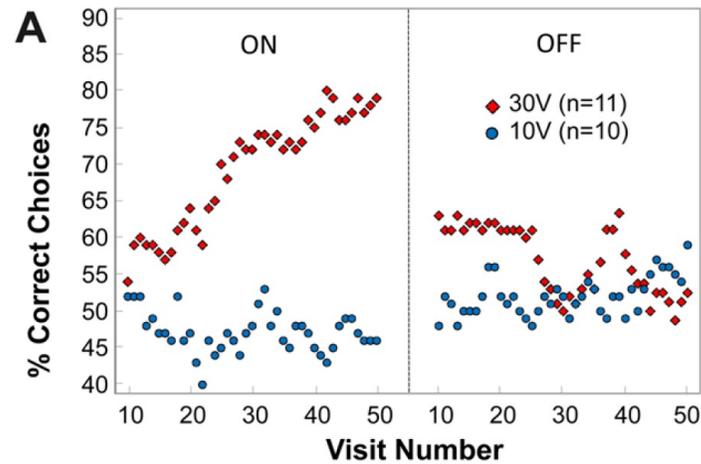
Fig. 1. Eh-pH diagram summarizing results of a literature review of physicochemical conditions reported in insect midguts, or equivalent regions of the digestive tract.

# Eh-pH et santé des plantes

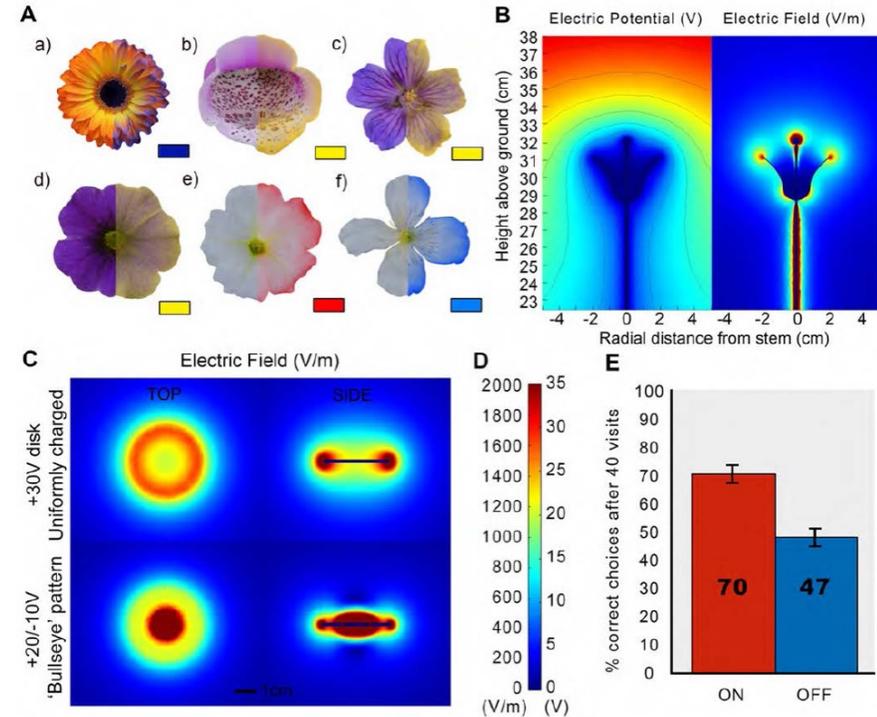
## Redox et insectes

Clarke et al. 2013. Detection and learning of floral electric fields by bumblebees. Science. 340:66-69

### Détection et apprentissage du champ électrique des plantes par les insectes



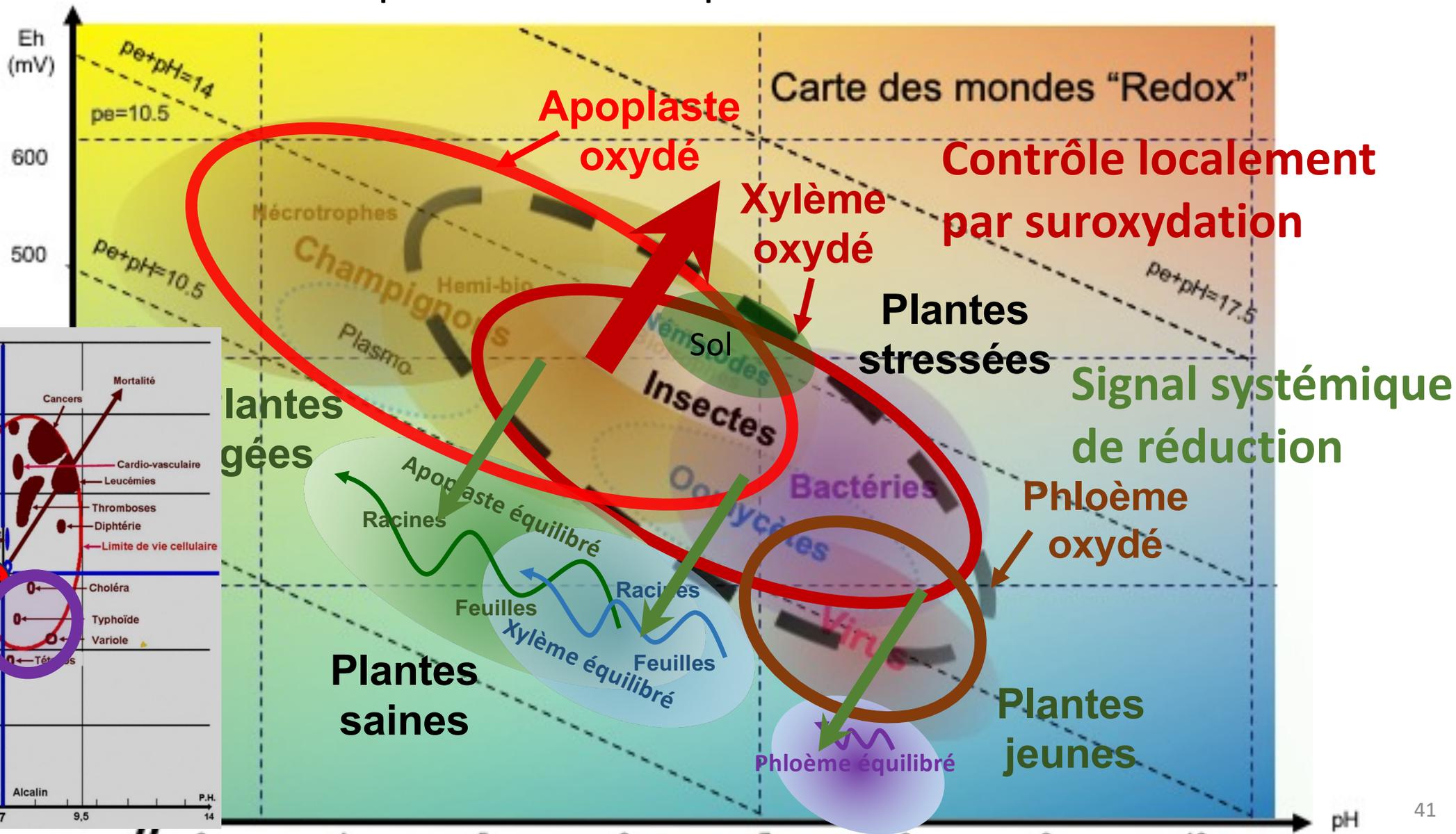
**Fig. 2.** Bumblebees learn the presence of an electric field. (A) Learning curves of foraging bees, trained to 30V (red diamonds) or 10V (blue circles) E-Flowers. Dashed line shows switching off electric field. (B) Mean correct choices to 30V (left) and 10V (right) E-Flowers over visits 41 to 50 in (A) during training (voltage on) and control (voltage off). Error bars show SEM.

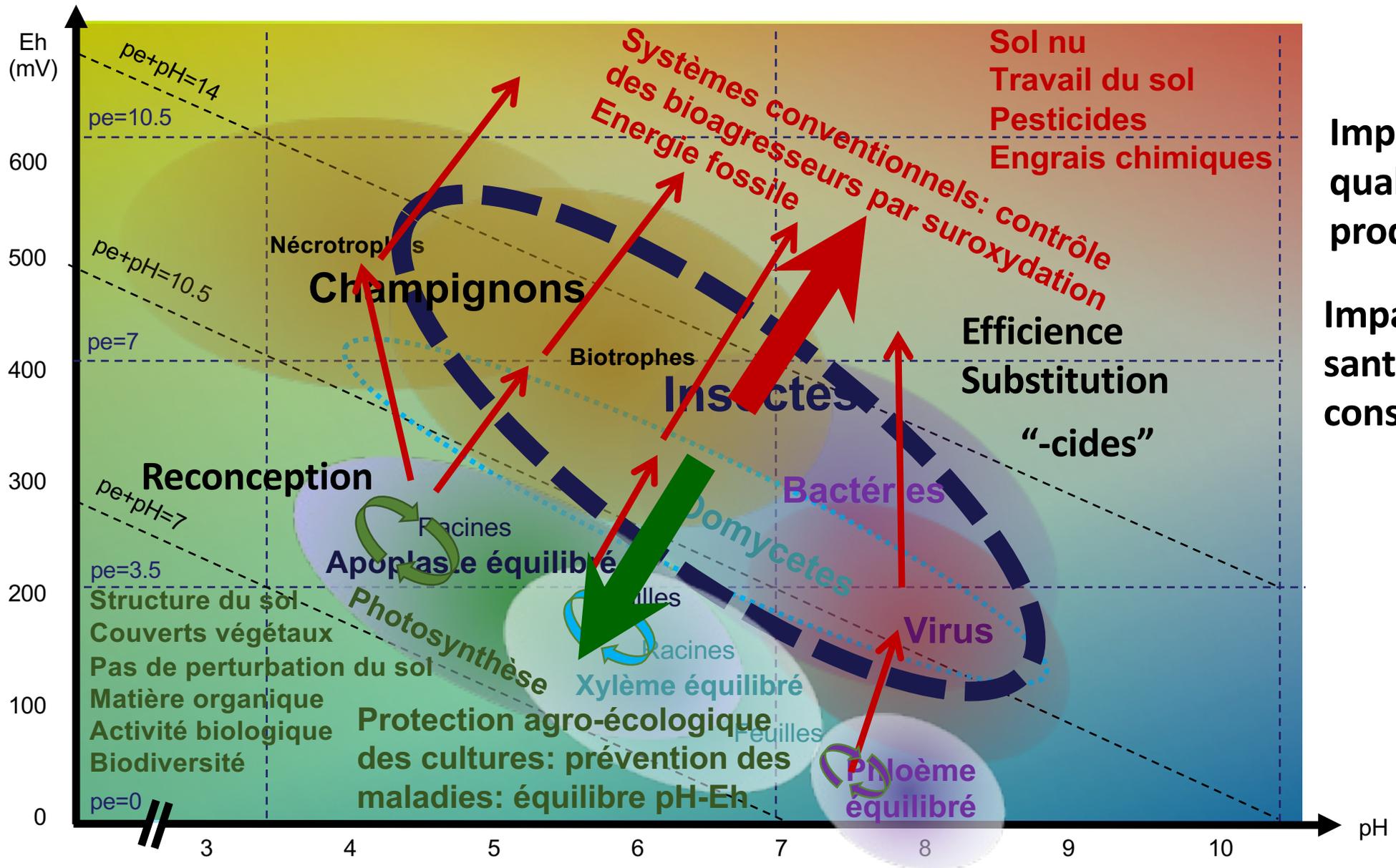


Hypothèse: Eh, pH et CE déterminent une fréquence et une impédance: signal radio

Emissions de composés volatiles

# Eh-pH et santé des plantes





Impacts sur la qualité des produits ?

Impacts sur la santé des consommateurs ?

# Perspective « Eh-pH et CE » pour la compréhension des processus: « l'arrière plan »

Toute l'énergie du système vient de la **photosynthèse** => changement de perspective

=> Temps et espace: Couverts végétaux et agroforesterie

=> Efficacité:

=> Restauration de conditions de milieu favorable: **structure du sol** = "niches" pH-Eh-CE

=> Nutrition: de la fertilisation des cultures ou des systèmes de cultures à la **fertilisation de l'écosystème cultivé, en foliaire si carences induites par les conditions du milieu**

Les **microorganismes** sont très impactés et ont une très forte capacité à modifier les conditions Eh-pH-CE : les plantes et les animaux « élèvent » des microorganismes

Les **bioagresseurs** se développent dans des conditions Eh-pH-CE spécifiques:  
Défense des cultures = « guerre rédox »

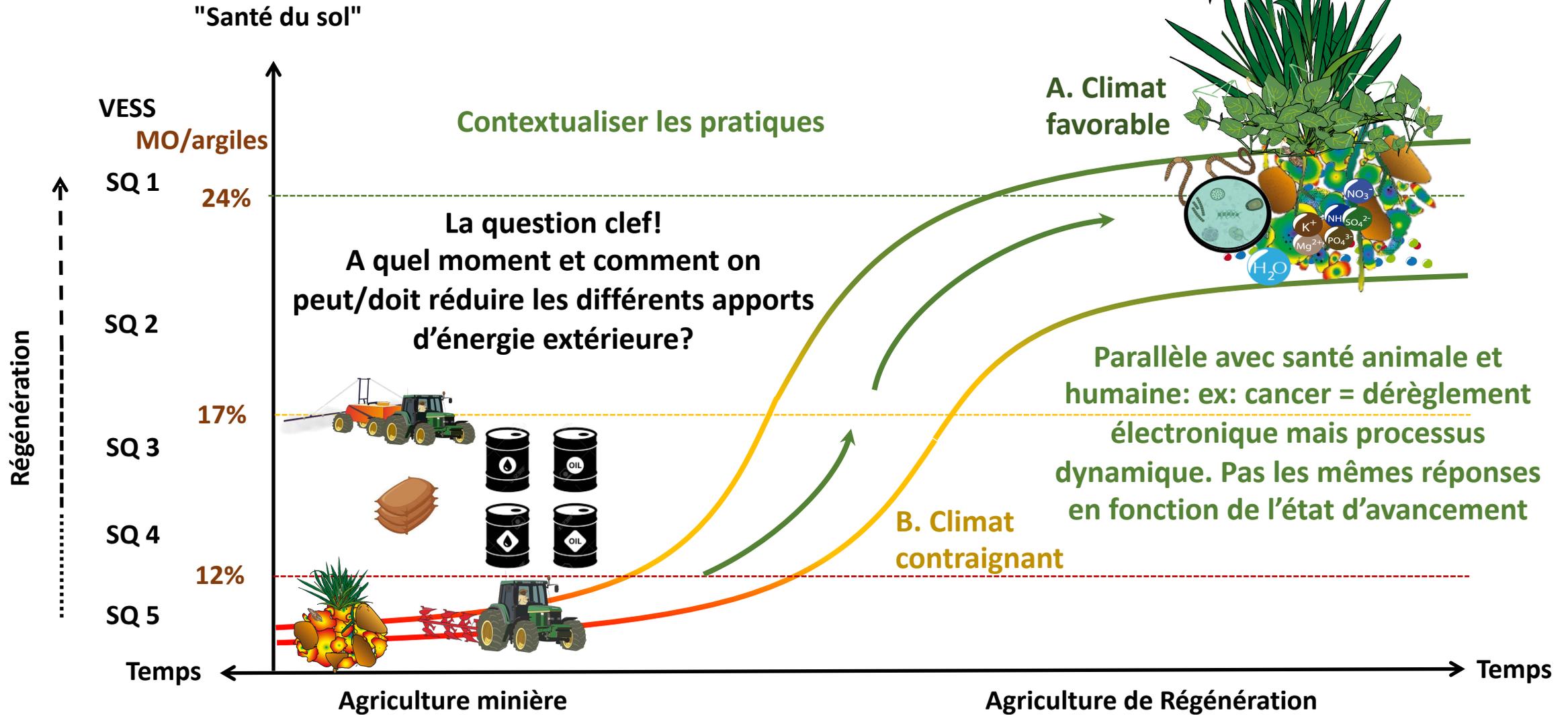
Impacts des pratiques sur santé des sols, des plantes, et la qualité des produits  
(=> vinification) Comprendre, traduire, utiliser...

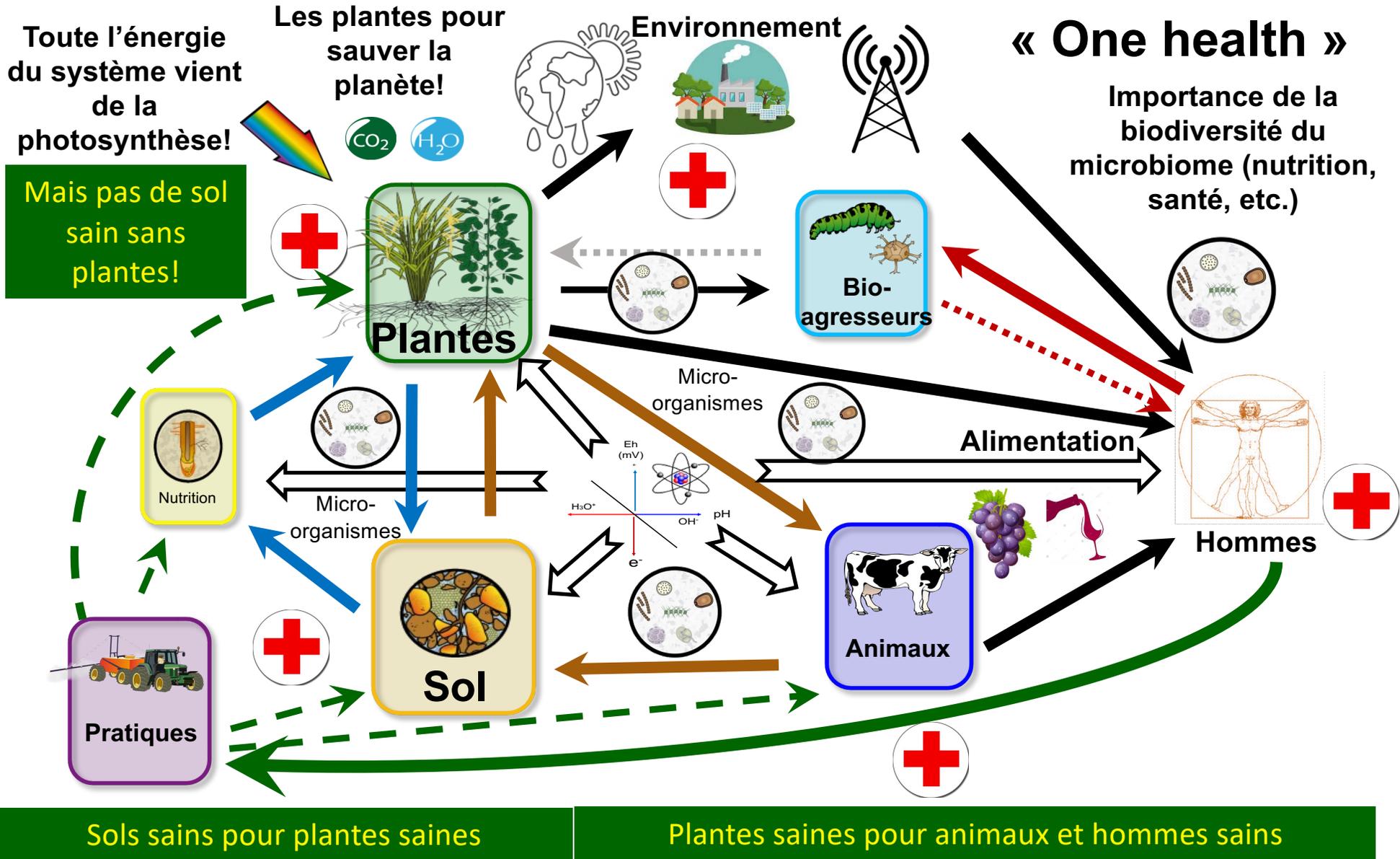
Compréhension dynamique et spatialisée: importance des **gradients** et de la **capacité tampon**  
**Contextualiser** les pratiques en fonction de l'état de dégradation/restauration du milieu



# Implications pratiques

TOUTE L'ÉNERGIE DU SYSTÈME VIENT DES PLANTES !!!



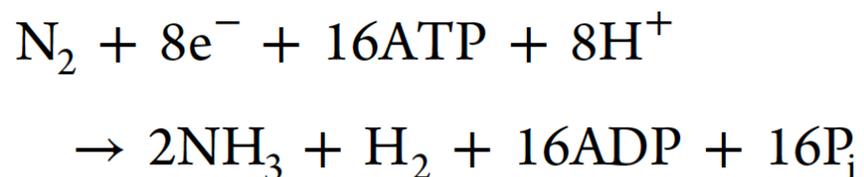


# Impacts des pratiques/systèmes agricoles sur Eh-pH

## Impact des plantes sur la santé du sol :

### Rôle des légumineuses

#### Fixation d'azote



### Relarguent H<sub>2</sub>, grand quantité d'énergie

Bohrerova Z *et al.* **2004**. *Soil & Tillage Research* 77, 25-33.

Paustian K *et al.* **1997**. *Soil Use and Management* 13, 230-244.

Dong *et al.* **2003** *Plant, Cell and Environment* (2003) 26, 1875–1879

CSIRO PUBLISHING

*Functional Plant Biology*, 2018, 45, 783–792

<https://doi.org/10.1071/FP17301>

Review

### Roles of hydrogen gas in plants: a review

Changxia Li<sup>A</sup>, Tingyu Gong<sup>A</sup>, Biting Bian<sup>A</sup> and Weibiao Liao<sup>A,B</sup>

<sup>A</sup>College of Horticulture, Gansu Agricultural University, 1 Yinmen Village, Anning District, Lanzhou 730070, China.

<sup>B</sup>Corresponding author. Email: liaowb@gsau.edu.cn

**Abstract.** Hydrogen gas (H<sub>2</sub>) was first identified as a unique molecular messenger in animals. Since H<sub>2</sub> was reported as a novel antioxidant, it has been proven effective in treating many diseases. However, the studies concerning H<sub>2</sub> in plants are just beginning to emerge. Here, two paths of H<sub>2</sub> production in plants have been reported, namely, hydrogenase and nitrogenase. H<sub>2</sub> has positive effects on seed germination, seedling growth, adventitious rooting, root elongation, harvest freshness, stomatal closure and anthocyanin synthesis. H<sub>2</sub> also can enhance plant symbiotic stress resistance commonly through the enhancement of antioxidant defence system. Moreover, H<sub>2</sub> shows cross talk with nitric oxide, carbon monoxide and other signalling molecules (for example, abscisic acid, ethylene and jasmonate acid). H<sub>2</sub> can regulate the expression of responsive genes under abiotic stress and during adventitious roots formation and anthocyanin biosynthesis. Future work will need to focus on the molecular mechanism of H<sub>2</sub> and its crosstalk with other signalling molecules in plants. With its promising application in agriculture, hydrogen agriculture will be welcomed in the near future.

# Hydrogène pour la thérapie de multiples maladies d'oxydation

Review  
**Molecular Hydrogen Therapy—A Review on Clinical Studies and Outcomes**

Hennie Marie Johnsen<sup>1,2,\*</sup>, Marianne Hiorth<sup>1</sup> and Jo Klavness<sup>1</sup>



Rev. Cardiovasc. Med. 2024; 25(1): 33  
<https://doi.org/10.31083/j.rcm2501033>

Review  
**Effects of Molecular Hydrogen in the Pathophysiology and Management of Cardiovascular and Metabolic Diseases**

Ram B. Singh<sup>1</sup>, Zuzana Sumbalova<sup>2</sup>, Ghizal Fatima<sup>3</sup>, Viliam Mojto<sup>4</sup>, Jan Fedacko<sup>5</sup>, Alex Tarnava<sup>6</sup>, Oleg Pokotylo<sup>7</sup>, Anna Gvozdjakova<sup>2</sup>, Kristina Ferenczyova<sup>8</sup>, Jana Vlkovicova<sup>8</sup>, Branislav Kura<sup>8,\*</sup>, Barbora Kalocayova<sup>8</sup>, Pavol Zenuch<sup>5</sup>, Jan Slezak<sup>8,\*</sup>

DOI:10.31557/APJCP.2023.24.1.3

Systematic Review: Molecular Hydrogen Therapy in Cancer Management

## REVIEW

Editorial Process: Submission:06/29/2022 Acceptance:01/07/2023

## A Systematic Review of Molecular Hydrogen Therapy in Cancer Management

Muhammad Nooraiman Zufayri Mohd Noor<sup>1</sup>, Adlin Sofea Alauddin<sup>1</sup>, Yin How Wong<sup>2</sup>, Chung Yeng Loo<sup>3</sup>, Eng Hwa Wong<sup>2</sup>, Priya Madhavan<sup>2</sup>, Chai Hong Yeong<sup>2,\*</sup>

## Molecular hydrogen therapy for neurological diseases: a review of current evidence

Dinesh Ramanathan<sup>1</sup>, Lei Huang<sup>1,2</sup>, Taylor Wilson<sup>1</sup>, Warren Boling<sup>1,\*</sup>

frontiers | Frontiers in Cell and Developmental Biology

<https://www.frontiersin.org/journals/cell-and-developmental-biology>

TYPE Review  
PUBLISHED 07 November 2023  
DOI 10.3389/fcell.2023.1283820

Check for updates

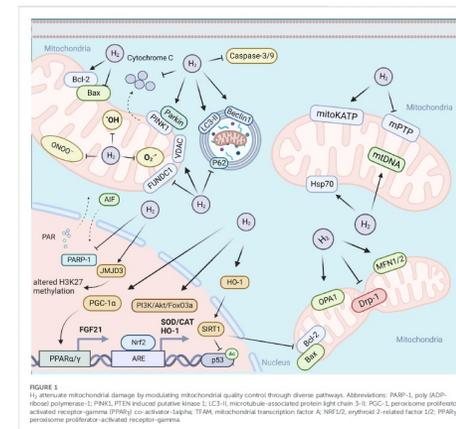
### OPEN ACCESS

EDITED BY  
Takuya Noguchi,  
Tohoku University, Japan

REVIEWED BY  
Pan Yu,  
Nanjing University, China  
Silvia Lores Arnaiz,  
University of Buenos Aires, Argentina

## Mitochondria: one of the vital hubs for molecular hydrogen's biological functions

Xiaoyue Zhang<sup>1,2†</sup>, Fei Xie<sup>1,2†</sup>, Shiwena Ma<sup>1,2†</sup>, Chen Ma<sup>1,2</sup>, Xue Jiang<sup>1,2</sup>, Yang Yi<sup>1,2</sup>, Yifei Song<sup>1,2</sup>, Mengyu Liu<sup>1,2</sup>, Pengxiang Zhao<sup>1,2</sup> and Xuemei Ma<sup>1,2\*</sup>

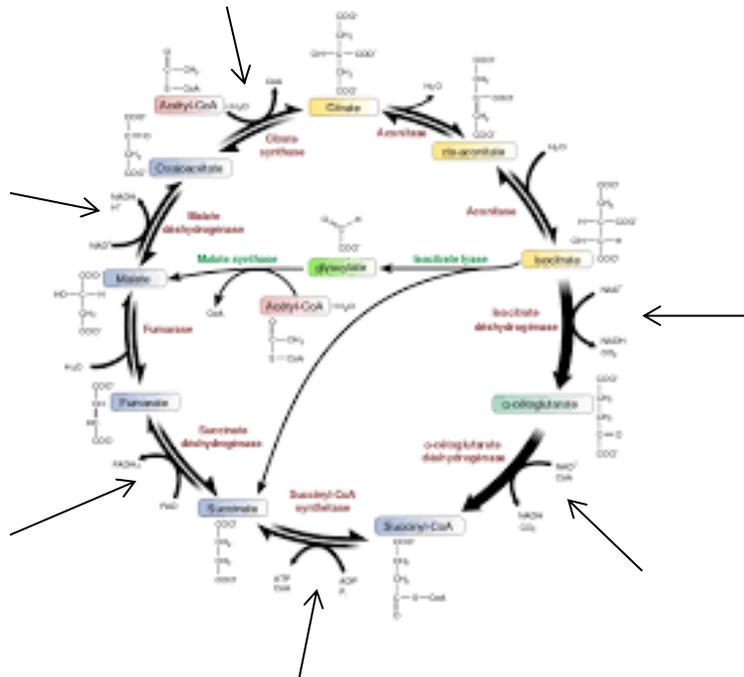


# Redox et physique quantique

Thermodynamique et cinétique

Conservation du spin dans les réactions (Marc Henry)

$O_2$  a un nombre pair d'électron, mais un spin de 1

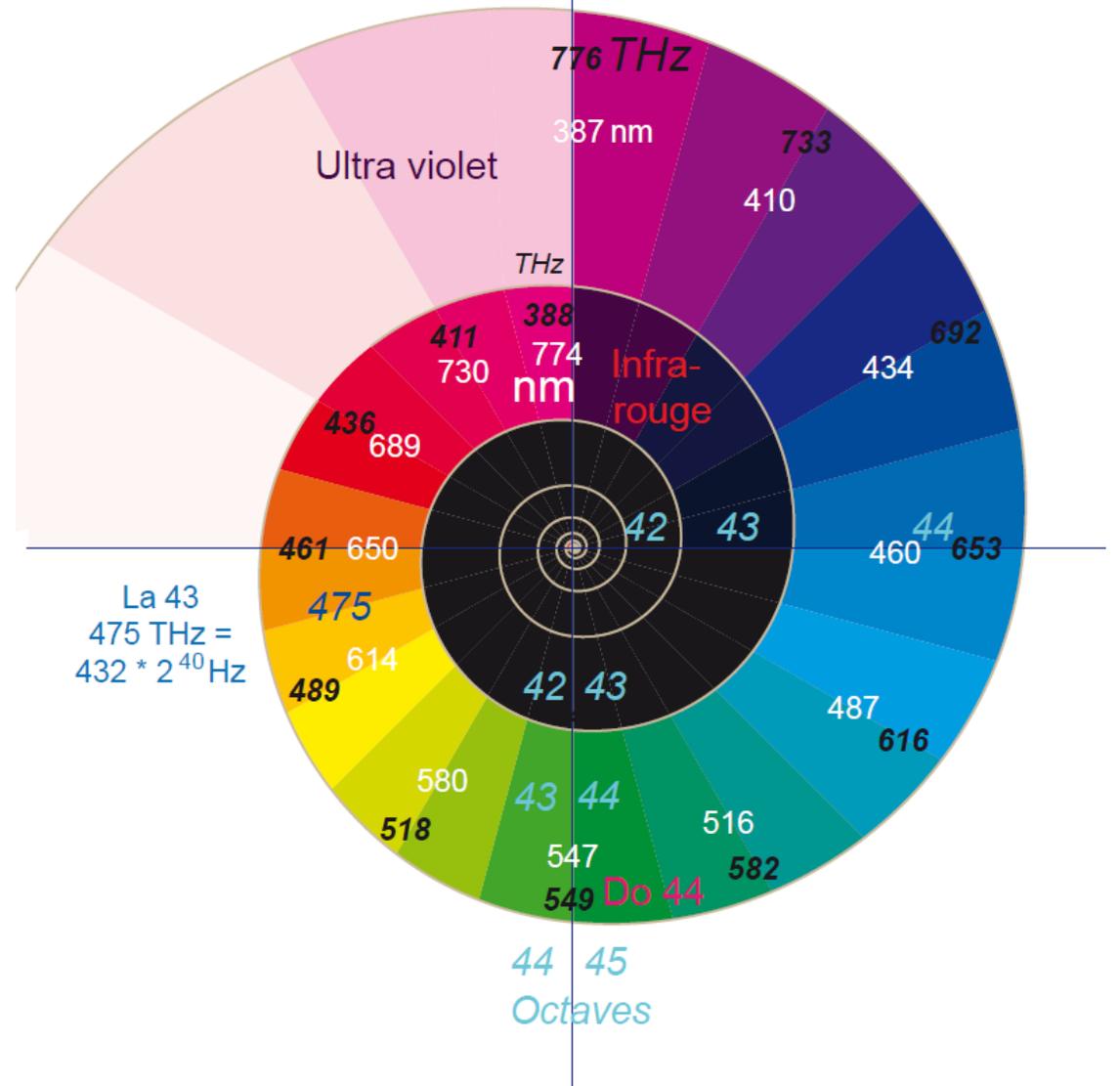
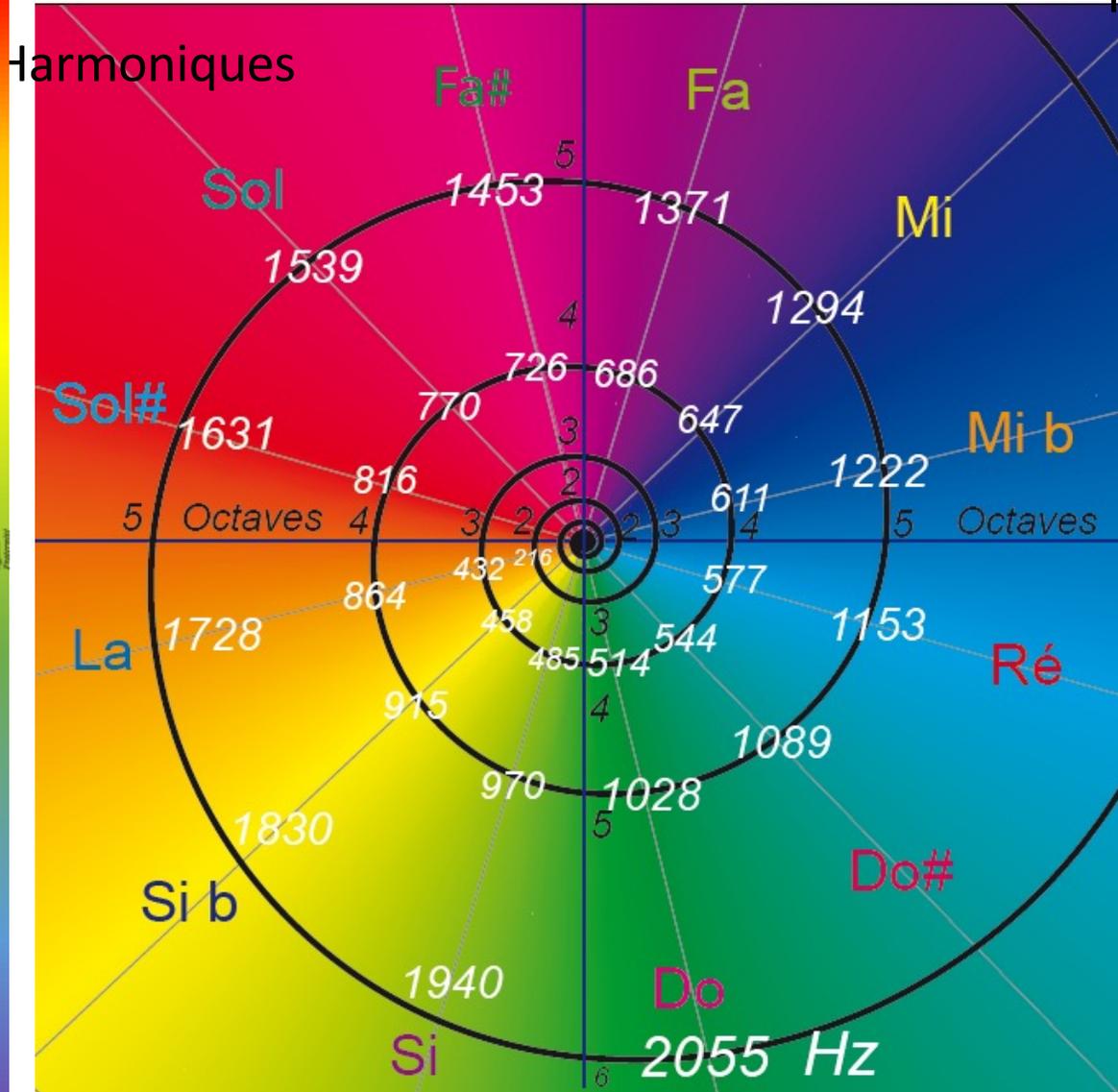


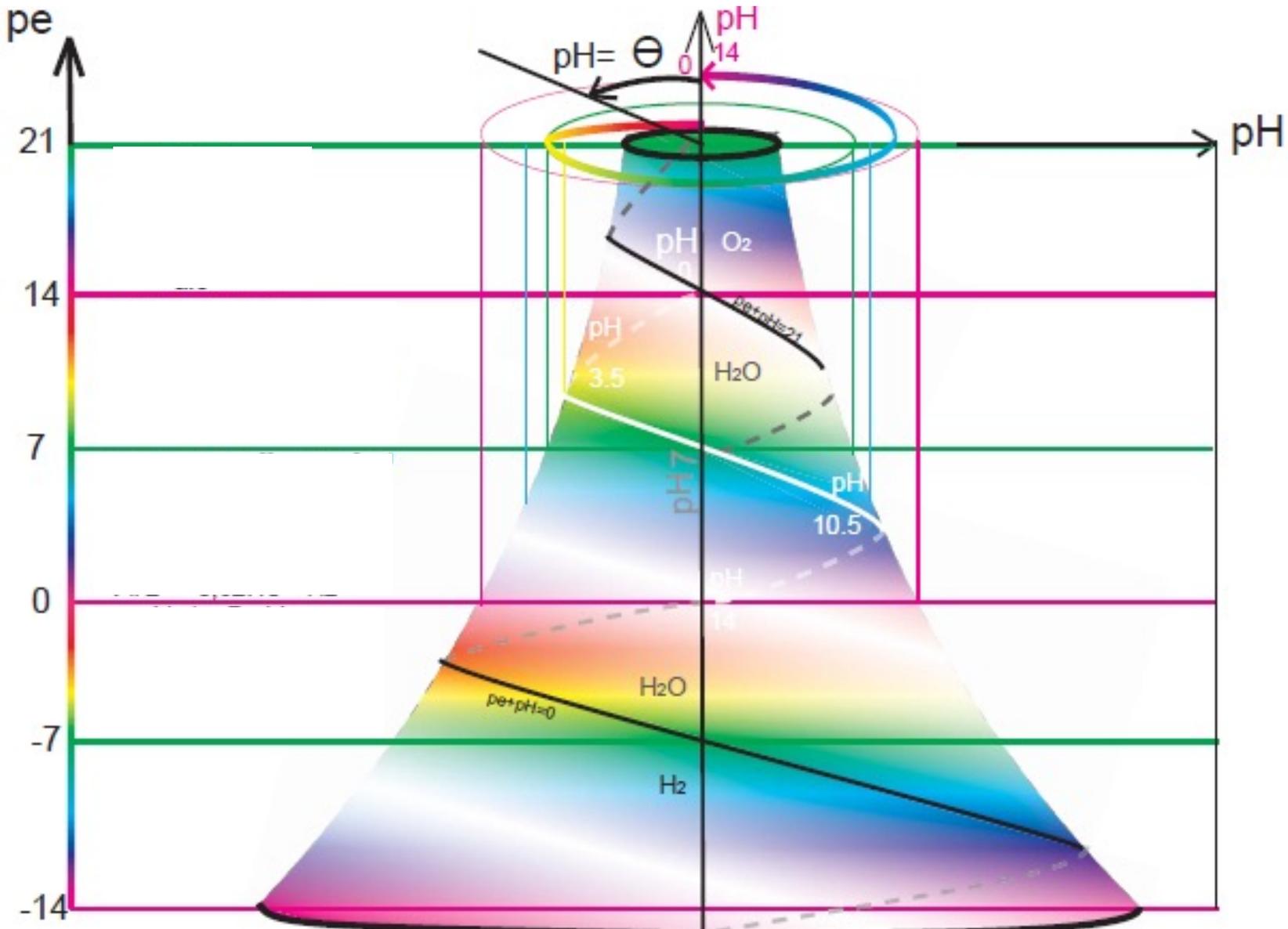
Cycle de Krebs, photosynthèse :  
récupération de niveau de spin dans  
les sous-cycles

Rôle du fer et du manganèse?

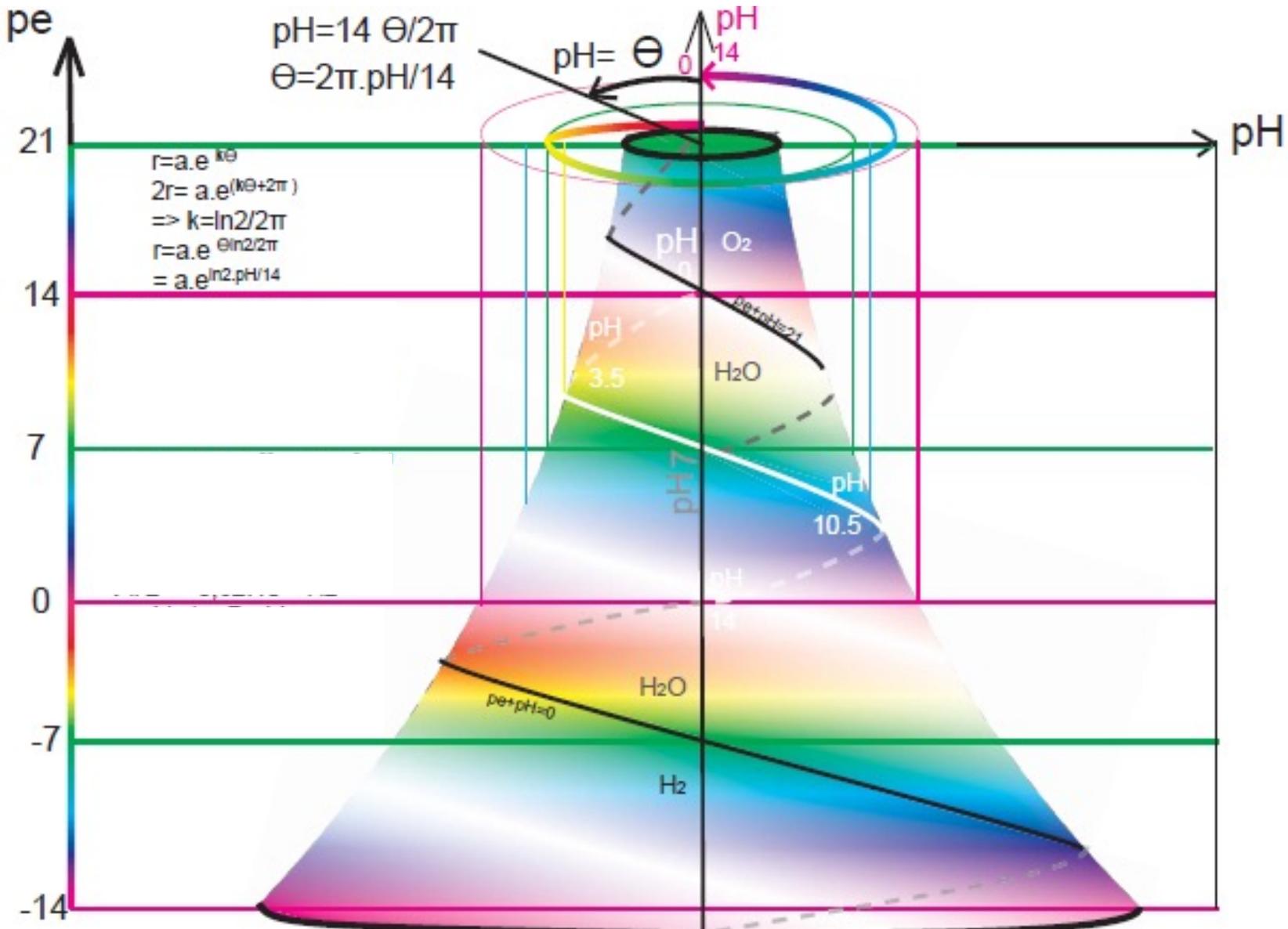
# Redox et physique quantique

## Fréquences de vibrations, sons et couleurs

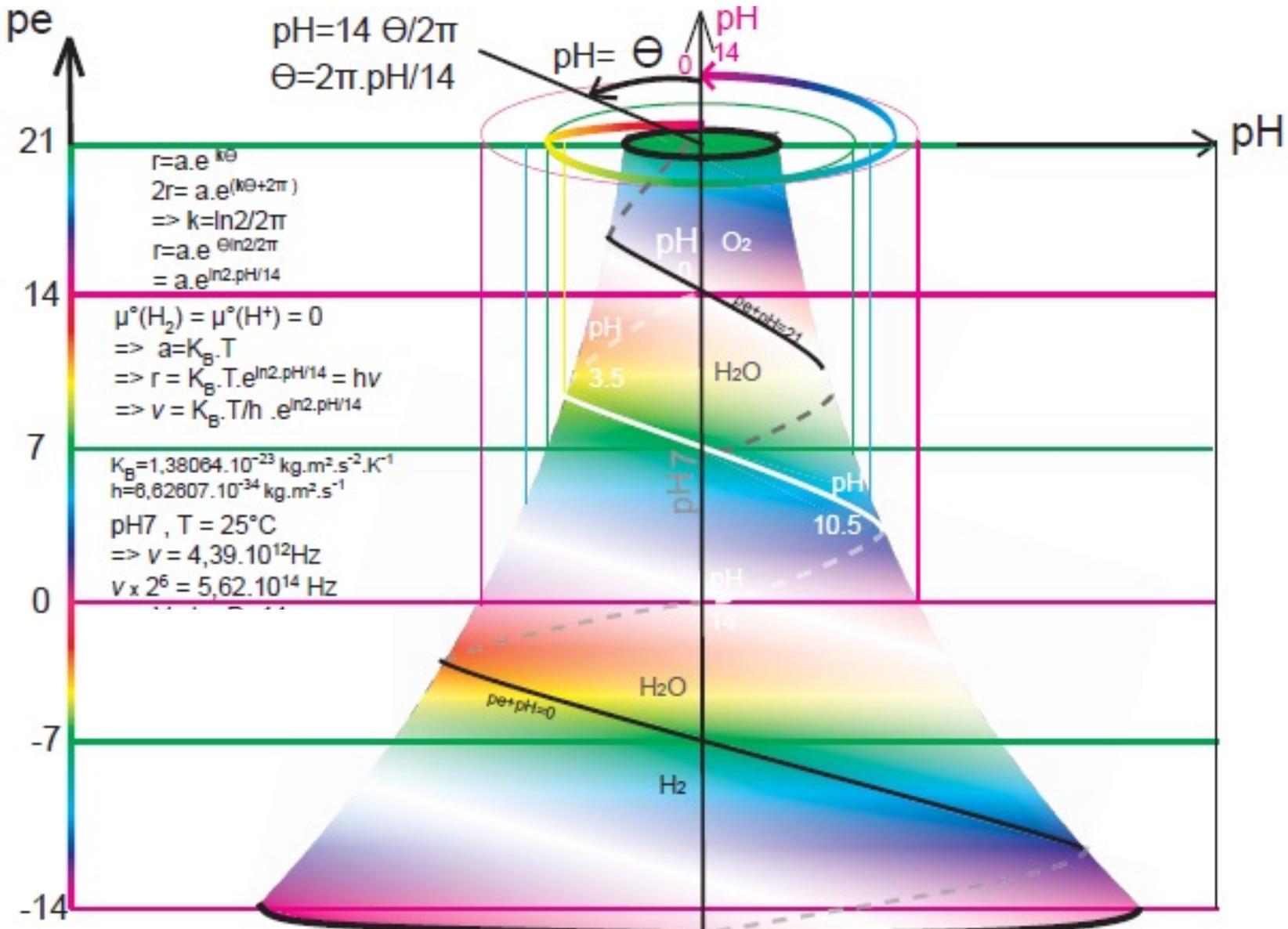


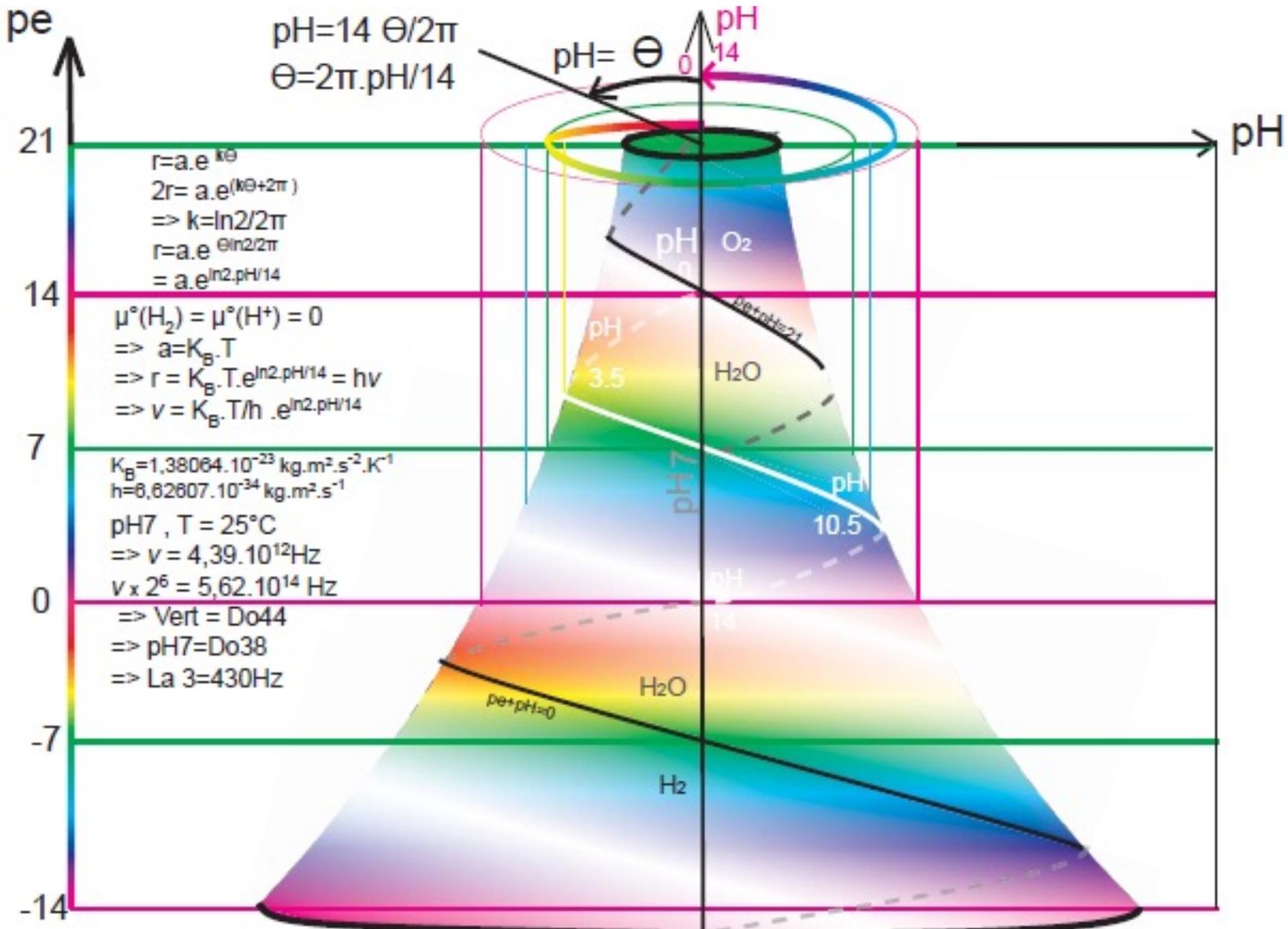


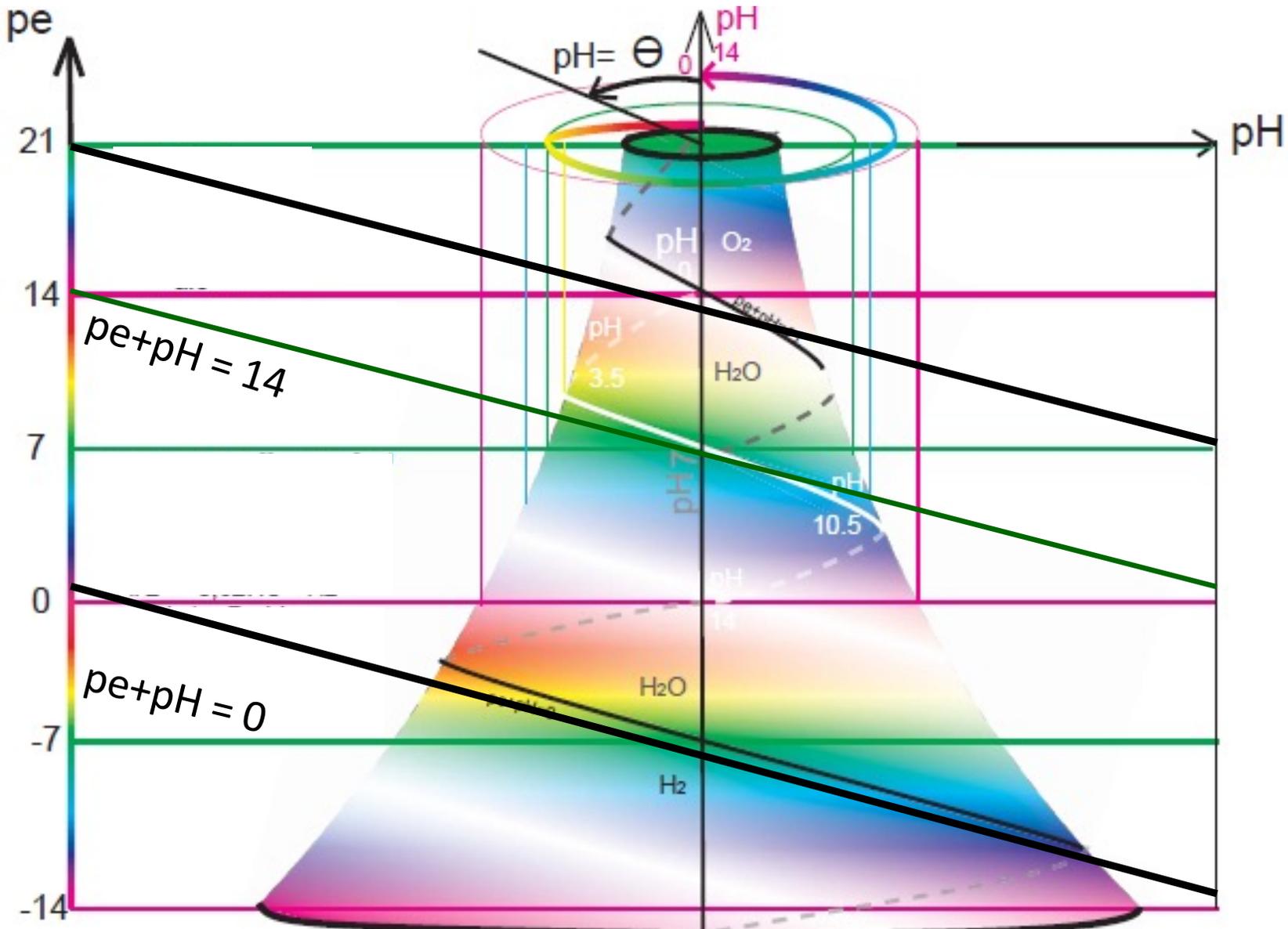






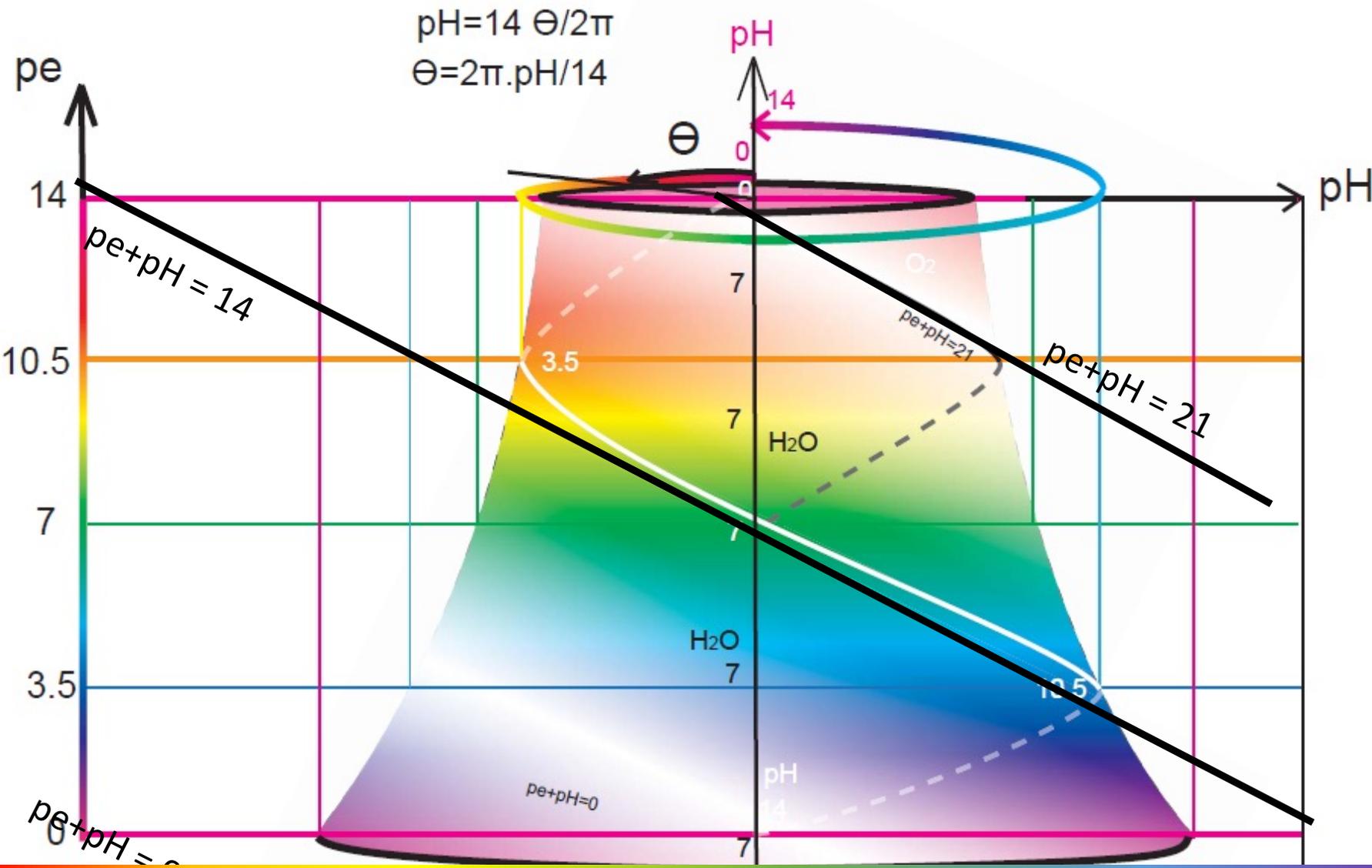




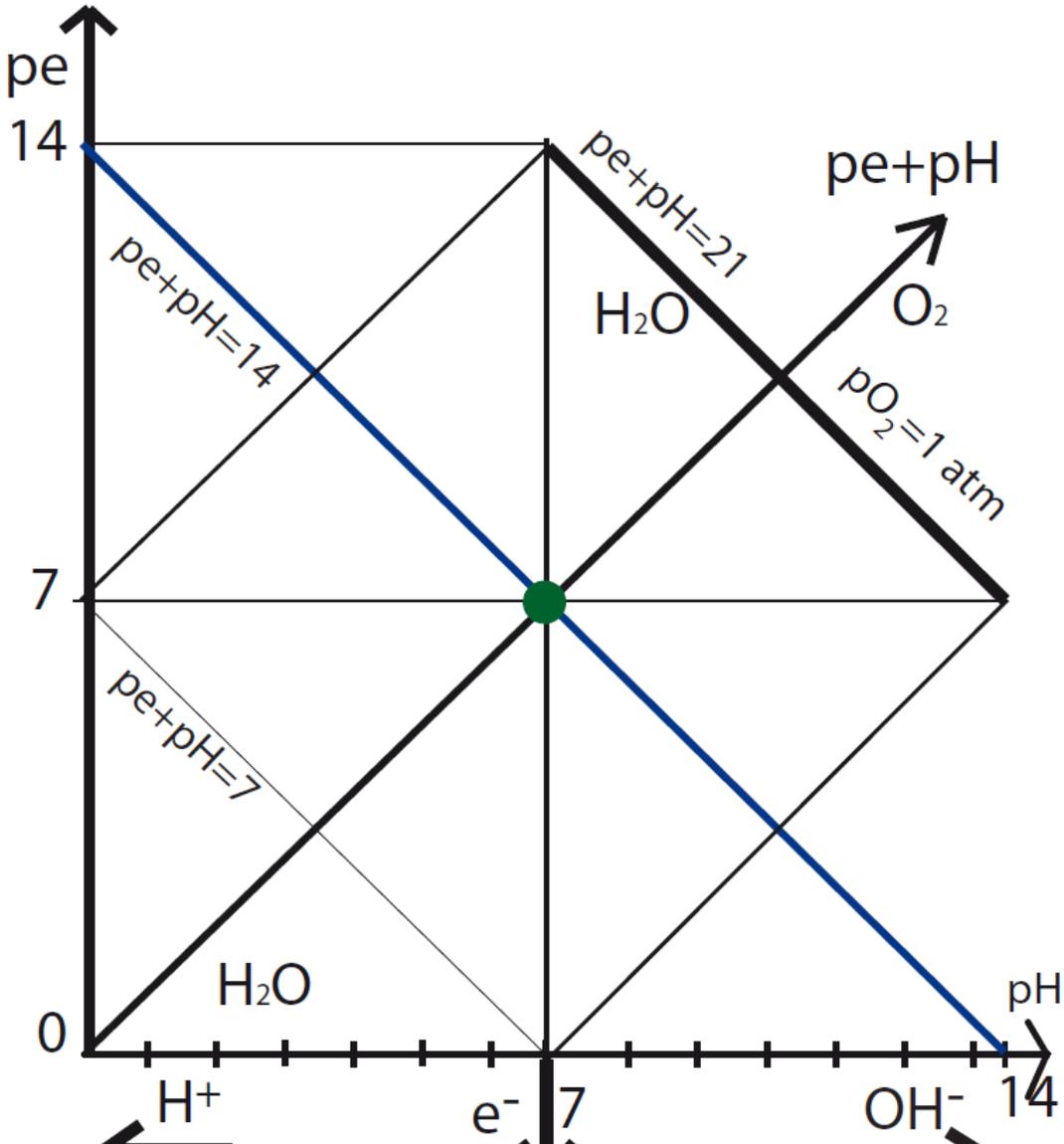








Niveau d'énergie =  
fréquence de vibration  
= couleur

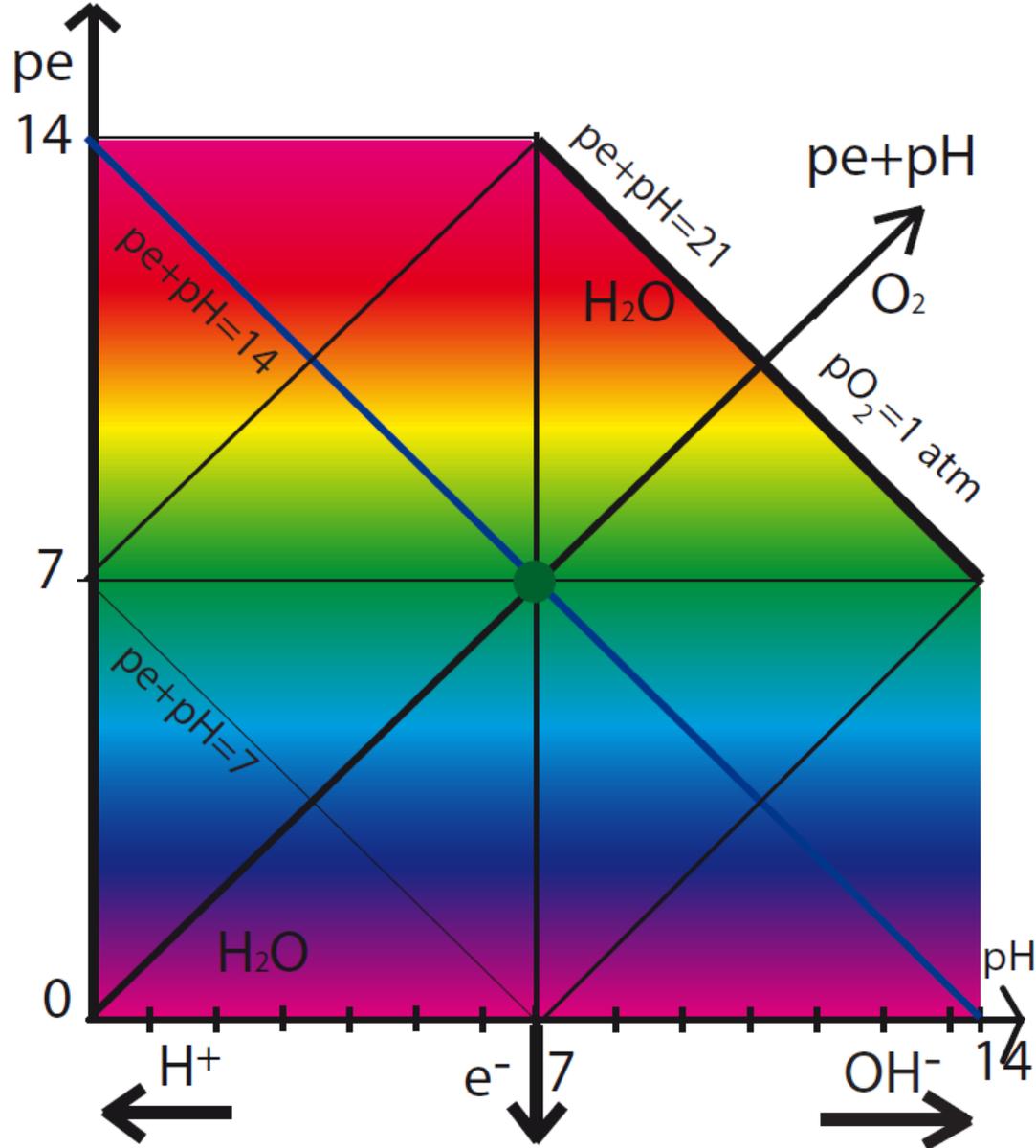


# Redox et physique quantique

# Hypothèses

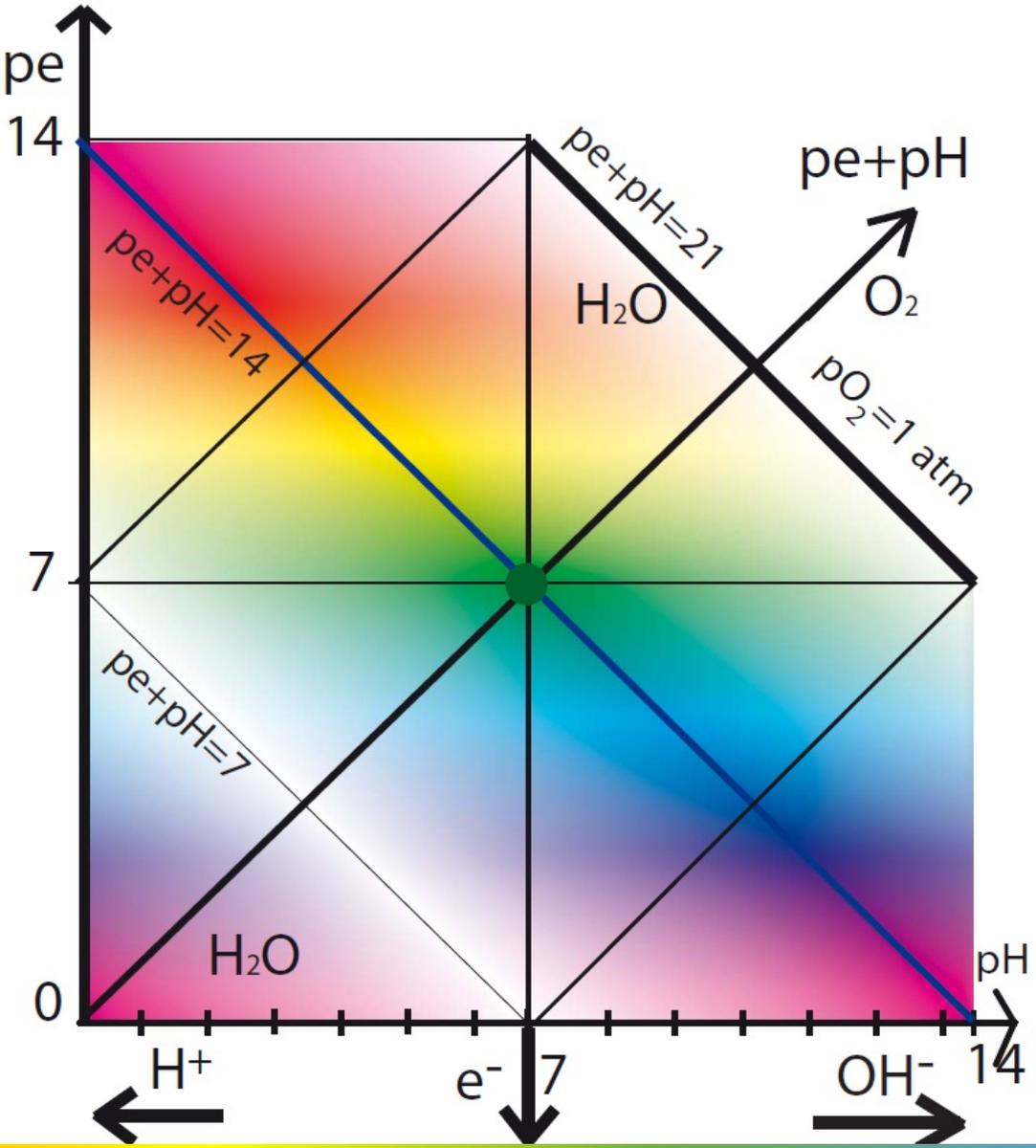
Niveau d'énergie =  
fréquence de vibration  
= couleur

Déphasage champ  
électrique / champ  
magnétique  
(saturation)



Niveau d'énergie =  
fréquence de vibration  
= couleur

Déphasage champ  
électrique / champ  
magnétique  
(saturation)



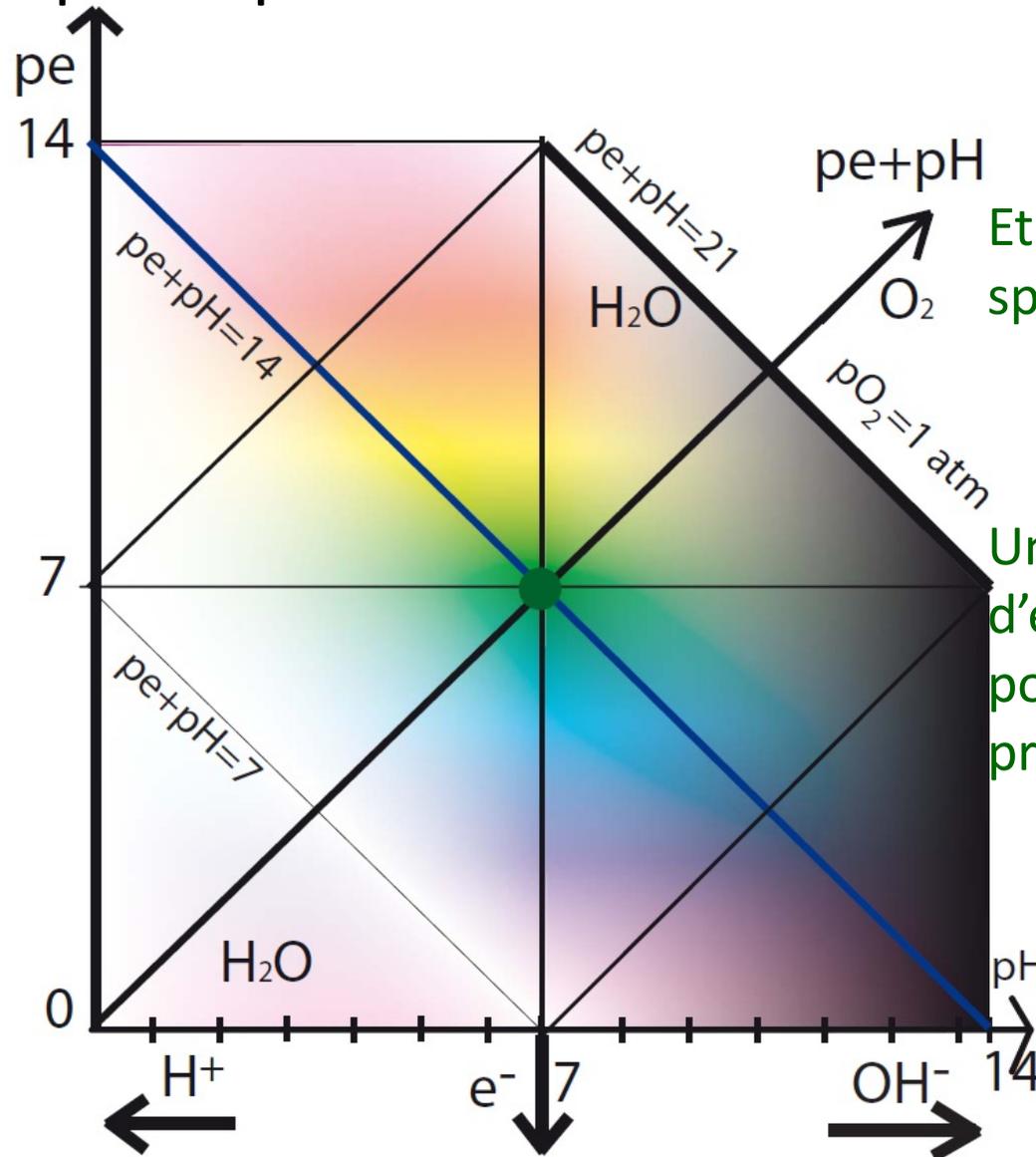
# Redox et physique quantique

# Hypothèses

pH-Eh = expression matérielle de diverses énergies, en harmoniques ???

Action de fréquences en harmoniques ???

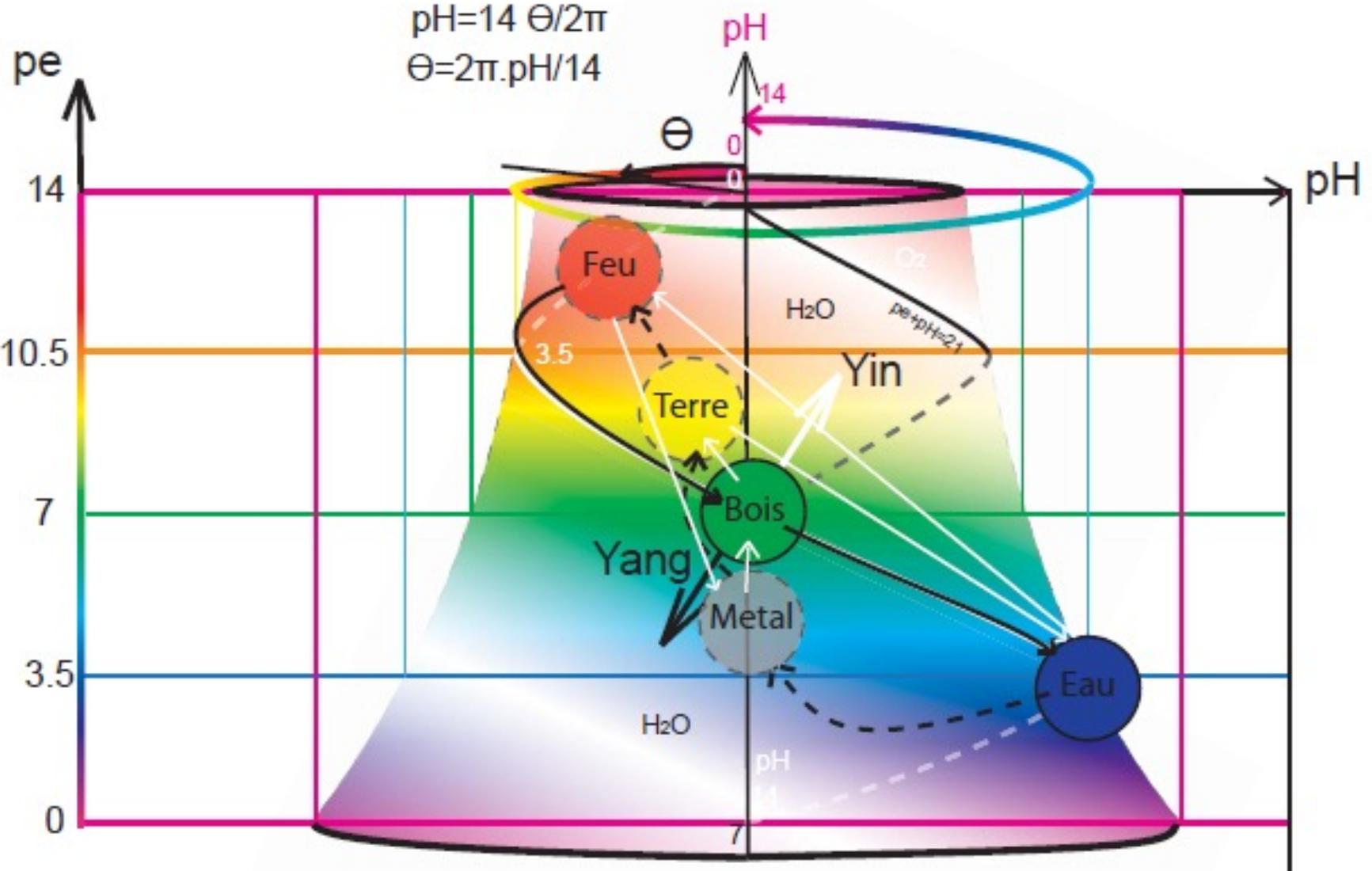
Son, lumières, lithothérapie, homéopathie, isothérapie, biodynamie, etc...

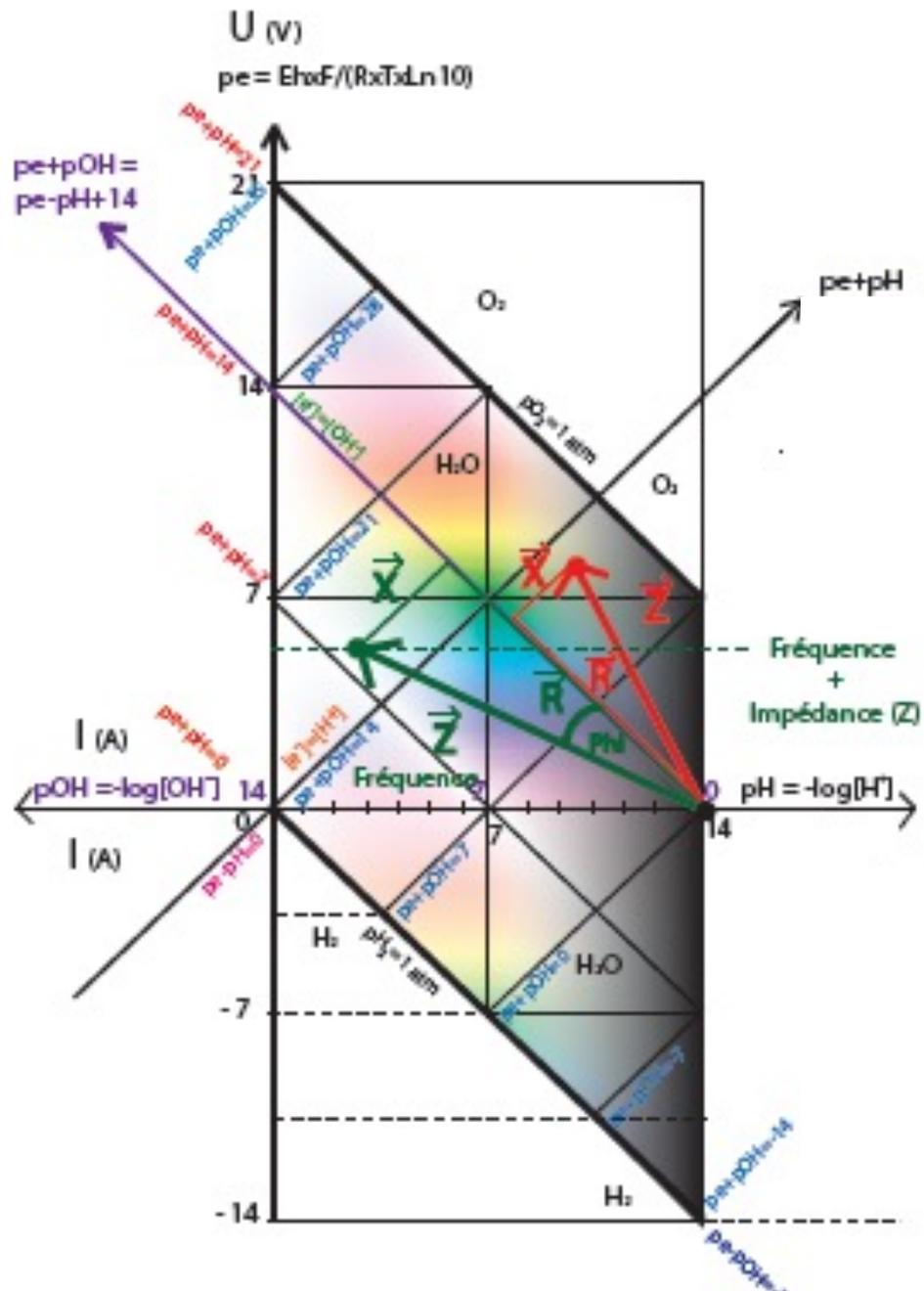


Etudes par spectrométrie (IR) ?

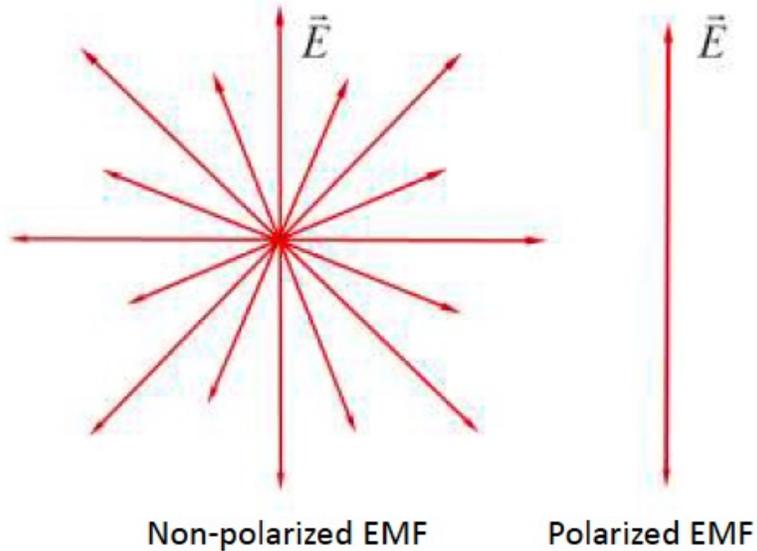
Un cadre théorique d'explication utilisable pour la mise en pratique ?

# Redox et physique quantique





# Ondes électromagnétiques et oxydation



All Man-made EMFs are totally Polarized and Coherent

Natural EMFs are never totally polarized

Terrestrial and Cell Membrane E-fields are locally polarized and static

## Unique properties of polarized and coherent (man-made) EMFs

1. They can produce constructive interference and amplify their intensities at certain locations
2. They force all charged particles (e.g. mobile ions) in living cells/tissue to oscillate in parallel and in phase with them

**Polarization and Coherence is The reason why EMR  $\sim 0.1 \text{ mW/cm}^2$  from a mobile phone is damaging, while solar EMR  $\sim 10 \text{ mW/cm}^2$  (100 times stronger) is vital.**

[Panagopoulos et al. (2015a): Polarization: A Key Difference between Man-Made and Natural EMFs, in regard to Biological Activity, *Nature, Scientific Reports*, 5, 14914]

Dimitris J. Panagopoulos

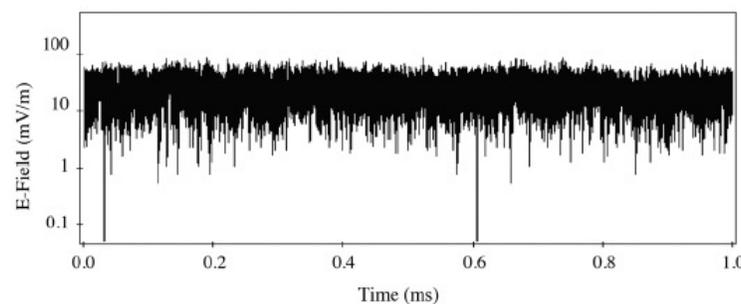
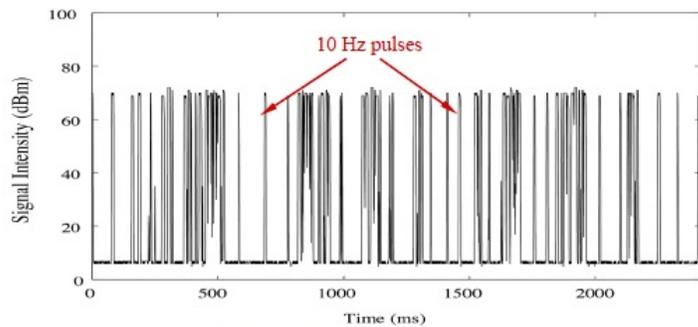
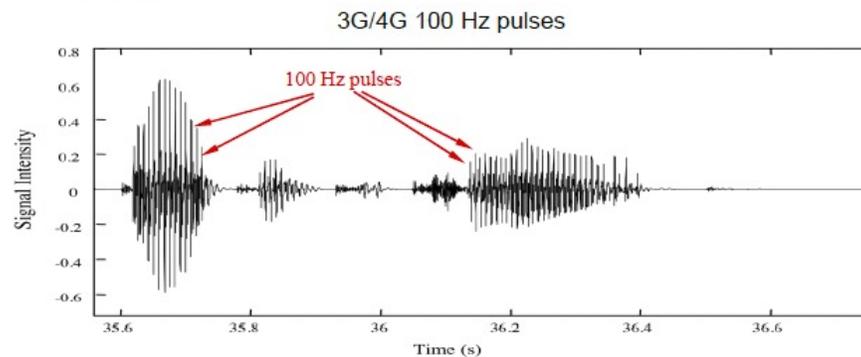
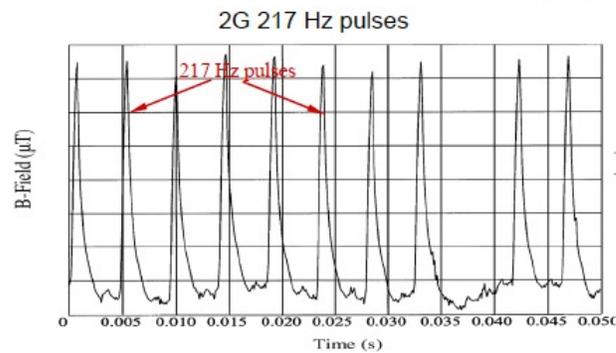
5

## Polarisation et cohérence

# Ondes électromagnétiques et oxydation

## ELF/ULF Pulsation and Variability of WC signals

[Figures from Panagopoulos (2023)]



# Ondes pulsées

Dimitris J. Panagopoulos

8

# Ondes électromagnétiques et oxydation

Important Observation:

**Intensity variations of the order of 20-30% in natural static and polarized/coherent EMFs (terrestrial electric and magnetic fields, cell membrane electric fields) induce cellular/health effects.**

Important Suggestion:

**Biological/Health Effects initiate when Polarized and Coherent EMFs undergo variations of  $\geq 20-30\%$  of their normal intensities**

Now, All Man-made EMFs are totally polarized and coherent, and

All Wireless Communication (WC) EMFs are highly variable with unexpected changes exceeding by more than 100% their normal average intensities.

**The vast majority of biological/health effects of all man-made EMFs at environmental intensities are NON-THERMAL (they are not accompanied by any significant tissue temperature increases)**

[Panagopoulos DJ, (2019a): Comparing DNA Damage Induced by Mobile Telephony and Other Types of Man-Made Electromagnetic Fields. *Mutation Research Reviews*, 781, 53-62.]

Dimitris J. Panagopoulos

6

Dimitris J. Panagopoulos

# Ondes électromagnétiques et oxydation



ACADEMIC  
PRESS

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



Biochemical and Biophysical Research Communications 298 (2002) 95–102

---

---

BBRC

---

---

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

## Mechanism for action of electromagnetic fields on cells

### Abstract

A biophysical model for the action of oscillating electric fields on cells, presented by us before [Biochem. Biophys. Res. Commun. 272(3) (2000) 634–640], is extended now to include oscillating magnetic fields as well, extended to include the most active biological conditions, and also to explain why pulsed electromagnetic fields can be more active biologically than continuous ones. According to the present theory, the low frequency fields are the most bioactive ones. The basic mechanism is the forced-vibration of all the free ions on the surface of a cell's plasma membrane, caused by an external oscillating field. We have shown that this coherent vibration of electric charge is able to irregularly gate electrosensitive channels on the plasma membrane and thus cause disruption of the cell's electrochemical balance and function [Biochem. Biophys. Res. Commun. 272(3) (2000) 634–640]. It seems that this simple idea can be easily extended now and looks very likely to be able to give a realistic basis for the explanation of a wide range of electromagnetic field bioeffects.

© 2002 Elsevier Science (USA). All rights reserved.

# Ondes électromagnétiques et oxydation

INTERNATIONAL JOURNAL OF ONCOLOGY 59: 92, 2021

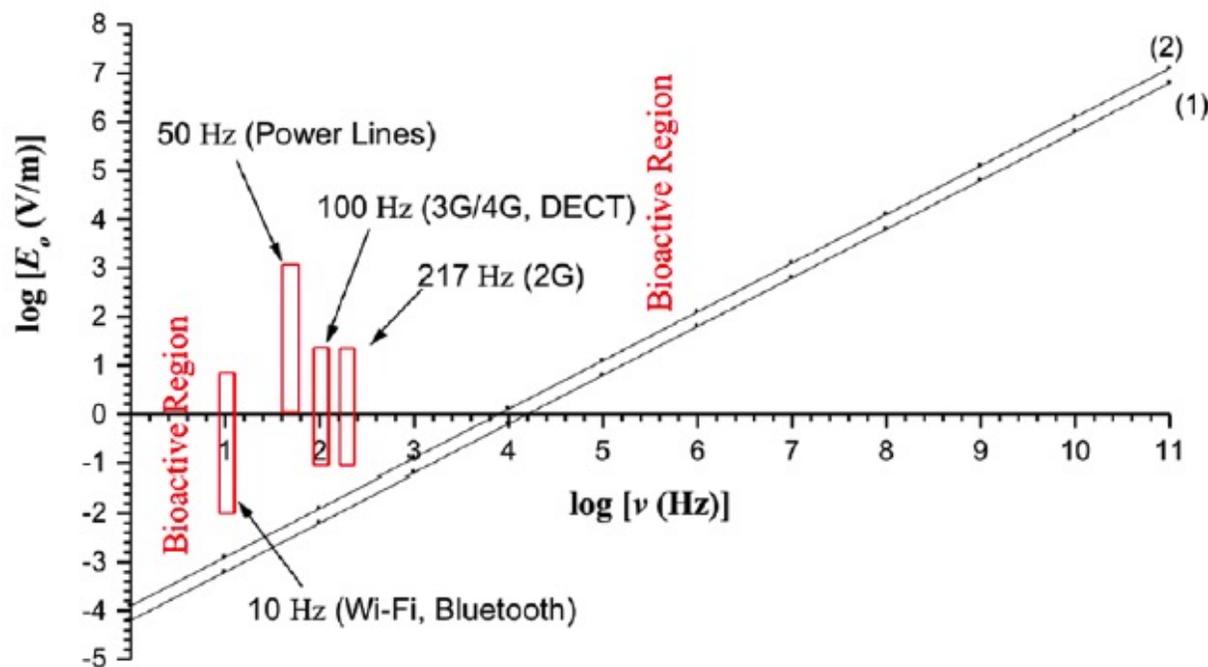
## **Human-made electromagnetic fields: Ion forced-oscillation and voltage-gated ion channel dysfunction, oxidative stress and DNA damage (Review)**

DIMITRIS J. PANAGOPOULOS<sup>1-3</sup>, ANDREAS KARABARBOUNIS<sup>4</sup>,  
IGOR YAKYMENKO<sup>5,6</sup> and GEORGE P. CHROUSOS<sup>2</sup>

# Ondes électromagnétiques et oxydation

INTERNATIONAL JOURNAL OF ONCOLOGY 59: 92, 2021

7



Basses fréquences:  
Ouverture canaux  
ioniques

Hautes fréquences:  
polarisation des  
molécules => création  
de champs électriques?

Figure 1. E-field bioactivity diagram showing the bioactive combinations of electric field intensity and frequency capable of inducing biological/health effects according to the ion forced-oscillation mechanism for dysfunction of voltage-gated ion channels in cells. The ELF electric fields of power lines, 2G/3G/4G MT, DECT, Wi-Fi and Bluetooth, are within the bioactive region (above lines 1 and 2). Line 1 refers to pulsed fields, such as the ELF pulsations of WC EMFs (Condition 10), while line 2 refers to continuous (non-pulsed) fields such as those from power lines (Condition 9).

# Ondes électromagnétiques et oxydation

Hindawi Publishing Corporation  
BioMed Research International  
Volume 2015, Article ID 607053, 8 pages  
<http://dx.doi.org/10.1155/2015/607053>

*Review Article*

## **Real versus Simulated Mobile Phone Exposures in Experimental Studies**

**Dimitris J. Panagopoulos,<sup>1,2,3</sup> Olle Johansson,<sup>4</sup> and George L. Carlo<sup>5</sup>**

While experimental studies employing simulated EMF-emissions present a strong inconsistency among their results with less than 50% of them reporting effects, studies employing real mobile phone exposures demonstrate an almost 100% consistency in showing adverse effects. This consistency is in agreement with studies showing association with brain tumors, symptoms of unwellness, and declines in animal populations. Average dosimetry in studies with real emissions can be reliable with increased number of field measurements, and variation in experimental outcomes due to exposure variability becomes less significant with increased number of experimental replications. We conclude that, in order for experimental findings to reflect reality, it is crucially important that exposures be performed by commercially available mobile phone handsets.

# Magnetic field effect on the oxidation of organic substances by molecular oxygen

Evgeny M. Pliss<sup>1</sup>  | Aleksey M. Grobov<sup>1</sup>  | Anton K. Kuzaev<sup>1</sup>  |  
Anatoly L. Buchachenko<sup>1,2,3,4,5</sup> 

<sup>1</sup>P.G.Demidov Yaroslavl' State University, Yaroslavl', Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russian Federation

<sup>3</sup>N.N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>4</sup>Scientific Center, Chernogolovka, Russian Federation

<sup>5</sup>Moscow University, Moscow, Russian Federation

## Correspondence

E.M. Pliss and Anatoly L. Buchachenko,  
P.G. Demidov Yaroslavl' State University,  
150003 Yaroslavl', Russian Federation.  
Email: pliss@uniyar.ac.ru;  
abuchach@chph.ras.ru

## Funding information

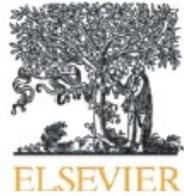
Russian Science Foundation, Grant/  
Award Number: 14-23-00018

## Abstract

Magnetic field effect (ME) on certain steps of chain oxidation of organic compounds of different series by molecular oxygen in liquid phase (initiation, chain propagation, and termination) is presented as a function of  $[O_2]$  in two regimes. At low concentration of oxygen ( $<1.5$  mM), magnetic field accelerates oxidation by 10% to 100%, but at high concentration no magnetic effect is detected. The dominating contribution into the magnetic effect (ME) is provided by reaction of alkyl radicals to oxygen:  $R^\bullet + O_2 \rightarrow RO_2^\bullet$ . This reaction is stimulated by the Zeeman interaction which transforms in the encounter pair ( $R^\bullet O_2$ ) producing transformation of quartet spin state, which is spin forbidden to react, into the doublet spin state, which is spin allowed. At high concentration of oxygen, this reaction is not a limiting step and provides no magnetic effect on the total rate of oxidation.

## KEYWORDS

magnetic field effect, oxidation, oxygen



Contents lists available at ScienceDirect

# Science of the Total Environment

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/scitotenv](http://www.elsevier.com/locate/scitotenv)



## Short Communication

### Anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields as an emerging threat to wildlife orientation

Alfonso Balmori

*Consejería de Medio Ambiente, Junta de Castilla y León, C/ Rigoberto Cortejo, 14, 47071 Valladolid, Spain*



#### HIGHLIGHTS

- The growth of wireless telecommunication technologies causes increased electrosmog.
- Radio frequency fields in the MHz range disrupt insect and bird orientation.
- Radio frequency noise interferes with the primary process of magnetoreception.
- Existing guidelines do not adequately protect wildlife.
- Further research in this area is urgent.

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 5 January 2015

Received in revised form 20 February 2015

Accepted 22 February 2015

Available online 4 March 2015

Editor: P. Kassomenos

##### Keywords:

Ecological effect  
 Electromagnetic field exposure  
 Environmental pollution  
 Magnetic compass  
 Nonthermal effects  
 Orientation

#### ABSTRACT

The rate of scientific activity regarding the effects of anthropogenic electromagnetic radiation in the radiofrequency (RF) range on animals and plants has been small despite the fact that this topic is relevant to the fields of experimental biology, ecology and conservation due to its remarkable expansion over the past 20 years. Current evidence indicates that exposure at levels that are found in the environment (in urban areas and near base stations) may particularly alter the receptor organs to orient in the magnetic field of the earth. These results could have important implications for migratory birds and insects, especially in urban areas, but could also apply to birds and insects in natural and protected areas where there are powerful base station emitters of radiofrequencies. Therefore, more research on the effects of electromagnetic radiation in nature is needed to investigate this emerging threat.

© 2015 Elsevier B.V. All rights reserved.

# Modulation de phase?

**Abstract:** Ambient levels of nonionizing electromagnetic fields (EMF) have risen sharply in the last five decades to become a ubiquitous, continuous, biologically active environmental pollutant, even in rural and remote areas. Many species of flora and fauna, because of unique physiologies and habitats, are sensitive to exogenous EMF in ways that surpass human reactivity. This can lead to complex endogenous reactions that are highly variable, largely unseen, and a possible contributing factor in species extinctions, sometimes localized. Non-human magnetoreception mechanisms are explored. Numerous studies across all frequencies and taxa indicate that current low-level anthropogenic EMF can have myriad adverse and synergistic effects, including on orientation and migration, food finding, reproduction, mating, nest and den building, territorial maintenance and defense, and on vitality, longevity and survivorship itself. Effects have been observed in mammals such as bats, cervids, cetaceans, and pinnipeds among others, and on birds, insects, amphibians, reptiles, microbes and many species of flora. Cyto- and geno-toxic effects have long been observed in laboratory research on animal models that can be extrapolated to wildlife. Unusual multi-system mechanisms can come into play with non-human species – including in aquatic environments – that rely on the Earth’s natural geomagnetic fields for critical life-sustaining information. Part 2 of this 3-part series includes four online supplement tables of effects seen in animals from both ELF and RFR at

vanishingly low intensities. Taken as a whole, this indicates enough information to raise concerns about ambient exposures to nonionizing radiation at ecosystem levels. Wildlife loss is often unseen and undocumented until tipping points are reached. It is time to recognize ambient EMF as a novel form of pollution and develop rules at regulatory agencies that designate air as ‘habitat’ so EMF can be regulated like other pollutants. Long-term chronic low-level EMF exposure standards, which do not now exist, should be set accordingly for wildlife, and environmental laws should be strictly enforced – a subject explored in Part 3.

**Keywords:** cell phone towers/masts/base stations; Earth’s geomagnetic fields; magnetoreception, radiofrequency radiation (RFR); nonionizing electromagnetic fields (EMF); plants; wildlife.

DE GRUYTER

Rev Environ Health 2022; 37(3): 327–406

## Review Article

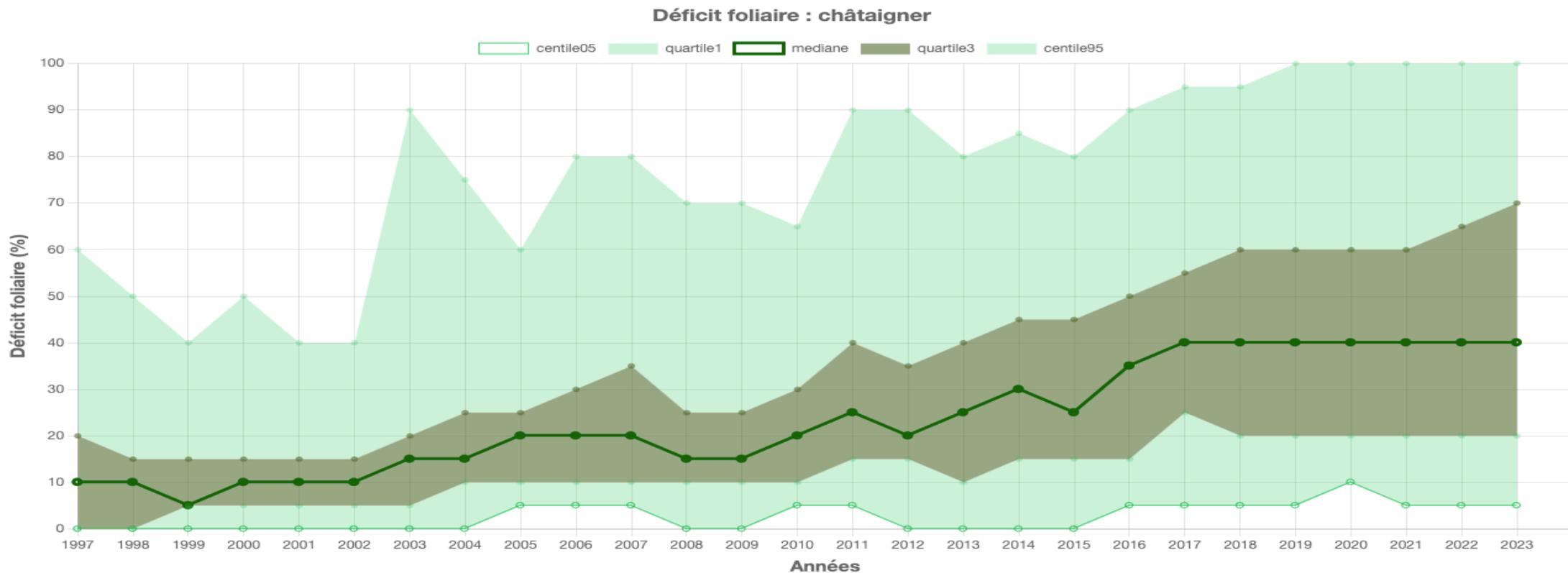
B. Blake Levitt\*, Henry C. Lai and Albert M. Manville II

# Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna, Part 2 impacts: how species interact with natural and man-made EMF

# Santé des forêts et EMF?

Choisir un graphique

Châtaigner



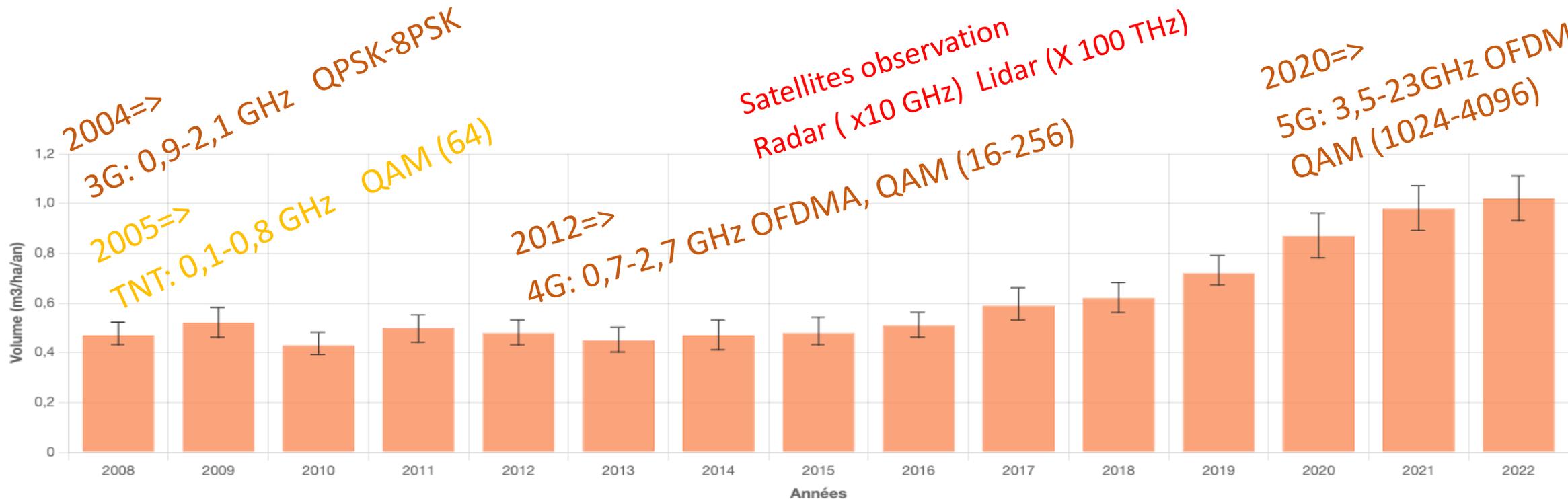
Graphiques présentant le déficit foliaire pour les catégories feuillus et résineux et les 12 essences principales, mesuré sur le réseau de suivi systématique 16 x 16 du DSF. Données DSF.

Lire ce graphique : dans l'exemple pour le châtaignier en 2016, sur l'échantillon d'arbres vivants évalués, 5 % des arbres présentaient 5 % de déficit foliaire ou moins (centile05), 1/4 des arbres présentaient moins de 15 % de déficit foliaire (quartile 1), la moitié des arbres présentaient moins de 35 % de déficit foliaire (médiane), les 3/4 des arbres présentaient moins de 50 % de déficit foliaire (quartile 3) et 95 % des arbres présentaient moins de 90 % de déficit

...foliaire (centile95)

<https://foret.ign.fr/themes/la-sante-des-forets-se-degrade>

# Santé des forêts et EMF?



Graphique présentant le volume annuel à l'hectare de nouveaux arbres morts, entre 2008 et 2022. Données IGN.

## Ondes polarisées, pulsées, modulation de phase !

2019 =>  
Starlink: 12 GHz, QPAM (1024)

Satellites observation  
Radar ( x10 GHz) Lidar (X 100 THz)

2020=>  
5G: 3,5-23GHz OFDMA,  
QAM (1024-4096)

Juin 2024=>

Earthcare: Radar 94 GHz  
+ Lidar 845 Thz (355 nm)

<https://foret.ign.fr/themes/la-sante-des-forets-se-degrade>