

Potentiel redox et pH des sols

Comprendre, mesurer et piloter le couple Eh-pH : un cadre pour la santé du sol et des cultures

par **OLT** — Association Canopée

Sommaire

1 Pourquoi s'intéresser au couple Eh-pH ?	3
2 Théorie (1) : l'oxydoréduction et le potentiel redox (Eh)	4
3 Théorie (2) : le potentiel hydrogène (pH)	4
4 Théorie (3) : le couple Eh-pH, croix redox et diagrammes de Pourbaix	4
5 Théorie (4) : Eh-pH dans la cellule et la plante	5
6 Implications (1) : Eh-pH et fonctionnement du sol	6
7 Implications (2) : où se situent les sols réels ?	7
8 Mesurer Eh et pH précisément	8
9 Actions correctrices : revenir vers la zone cible	10
10 Contextes d'application	10
11 Mettre en place un suivi pluriannuel	10
12 TL;DR — l'essentiel en valeurs cibles	12
13 Limites, précautions et mise en œuvre à Canopée	12
14 Références et pour aller plus loin	12

Résumé. Toute la vie du sol repose sur deux flux : un flux d'électrons (oxydoréduction, mesuré par le potentiel **Eh**) et un flux de protons (acidité, mesuré par le **pH**). Longtemps cantonné aux sols inondés, le couple **Eh-pH** s'impose aujourd'hui comme un cadre transdisciplinaire — popularisé par O. Husson (CIRAD) — pour lire le fonctionnement d'un système sol-plante-micro-organismes. Cette note construit d'abord un **panorama théorique étendu** : oxydoréduction, potentiel redox, potentiel hydrogène, croix redox et diagrammes de Pourbaix, homéostasie cellulaire. Elle en tire ensuite les **implications concrètes pour les sols** (disponibilité des nutriments, séquence des accepteurs d'électrons, matière organique comme « batterie », sensibilité aux bioagresseurs), détaille **comment mesurer précisément** Eh et pH, propose des **actions correctrices** selon les déséquilibres, et illustre les **contextes d'application** (diagnostic de parcelle, restauration de friche, lutte prophylactique). Un **suivi pluriannuel** est proposé, avec un graphe « zone cible » et seuils d'alerte. Un **résumé « TL;DR »** clôt la note avec les valeurs cibles.

Abstract. *Soil life is driven by two fluxes: an electron flux (redox, measured by Eh) and a proton flux (acidity, measured by pH). Once restricted to flooded soils, the Eh-pH couple is now a transdisciplinary framework (O. Husson, CIRAD) for reading soil/plant/microorganism systems. This note provides an extended theoretical overview, the concrete implications for soils (nutrient availability, electron-acceptor sequence, organic matter as a redox buffer, pest susceptibility), accurate measurement protocols, corrective actions, and application contexts (field diagnosis, brownfield restoration, preventive crop protection), with a multi-year monitoring chart and a plain-language summary of target values.*

Hypothèses

- Échelle visée : la **parcelle de jardin** et le sol **aérobie** cultivé (l'essentiel de la littérature historique portait sur les sols inondés / rizicoles).
- Mesure accessible à une association : matériel de terrain (redox-mètre + électrodes, pH-mètre), pas de laboratoire.
- Cadre théorique de référence : la synthèse de O. Husson (**Plant and Soil**, 2013) et la vulgarisation Solagro / Osez l'agroécologie.

Mots-clés — potentiel redox · Eh · pH · couple Eh-pH · diagramme de Pourbaix · rH2 · disponibilité des nutriments · santé du sol · bioagresseurs · restauration de friche

Keywords — *redox potential · Eh · pH · Eh-pH · Pourbaix diagram · nutrient availability · soil health · soil restoration*

Notations

Eh	potentiel d'oxydoréduction, exprimé en mV par rapport à l'ENH
pH	potentiel hydrogène (activité des protons H ⁺)
ENH	électrode normale à hydrogène — référence où Eh = 0
Ag/AgCl	électrode de référence usuelle (décalage à corriger vers l'ENH)
rH₂	indice d'oxydoréduction reliant Eh et pH (état redox « absolu »)
pe	potentiel électronique, -log de l'activité des électrons
MO	matière organique du sol
AFPS	porosité du sol accessible à l'air (<i>air-filled pore space</i>)

Définitions principales

- **Oxydoréduction (redox)** : réaction où un ou plusieurs **électrons** sont échangés. L'**oxydant** capte les électrons (il est réduit) ; le **réducteur** les cède (il est oxydé). « Oxydation = perte d'électrons ; Réduction = gain ».
- **Potentiel redox (Eh)** : mesure l'**activité des électrons** d'un milieu — sa tendance à céder (Eh bas, réducteur) ou à capter (Eh haut, oxydant) des électrons.
- **Potentiel hydrogène (pH)** : mesure l'**activité des protons** — l'acidité.
- **Couple Eh-pH** : les deux ne sont **pas indépendants**. Beaucoup de réactions du sol échangent à la fois protons et électrons ; Eh et pH doivent se lire **ensemble**.

Points clés

- **Domaine** : chimie et biologie des sols, nutrition des plantes, santé des cultures, diagnostic et restauration de parcelles.
- **Idée force** : « La vie est un petit courant électrique entretenu par le soleil » (A. Szent-Györgyi). Le sol se comporte comme une **batterie** rechargée par la photosynthèse ; Eh et pH en sont l'**état de charge** et l'**acidité**.
- **Valeurs cibles (sol cultivé aérobie)** : **pH** ≈ 6,5–7 et **Eh** ≈ 400–450 mV/ENH. En dehors, la plante dépense de l'énergie pour corriger son milieu et devient plus sensible aux carences, toxicités et bioagresseurs.
- **Mesure** : le **pH** est simple et fiable ; le **Eh** est délicat (électrodes, variabilité, étalonnage, correction de référence). À interpréter **toujours avec le pH**.
- **Levier principal** : la **matière organique**, qui tamponne le couple Eh-pH et recharge le sol en électrons. Le ratio **MO % / argile %** est un bon indicateur.

1 Pourquoi s'intéresser au couple Eh-pH ?

Les agronomes surveillent le pH depuis plus d'un siècle. Le **potentiel redox** (Eh), lui, est resté longtemps le « paramètre oublié » : on ne le mesurait guère que dans les rizières et les sols engorgés. Or, comme le rappelle l'agronome Olivier Husson dans une synthèse devenue une référence¹, **toute** la chimie et la biologie d'un sol sont gouvernées par **deux flux couplés** : un flux d'**électrons** (l'oxydoréduction, lue par Eh) et un flux de **protons** (l'acidité, lue par pH). Les ignorer, c'est se priver d'une clé de lecture puissante.

L'image la plus parlante est celle du **prix Nobel Albert Szent-Györgyi** : « ce qui fait tourner la vie, c'est un petit courant électrique entretenu par le soleil ». La photosynthèse capte l'énergie lumineuse et la stocke sous forme de pouvoir **réducteur** (des électrons « énergisés »). Le sol se comporte alors comme une **batterie** : la matière organique fraîche le recharge en électrons, l'oxygène de l'air le décharge.

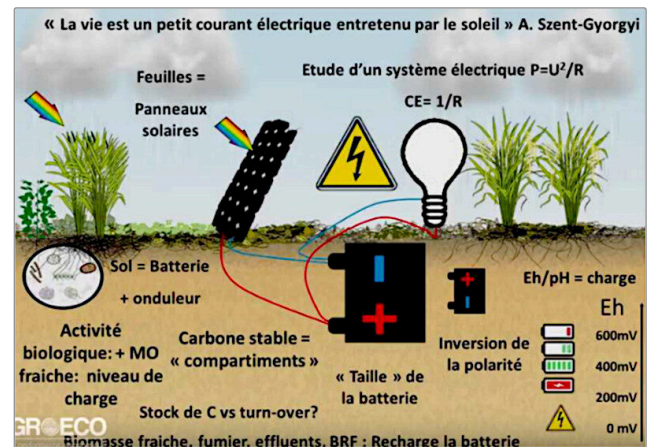


Figure 1. – Le sol vu comme une batterie rechargée par le soleil : les feuilles captent l'énergie (panneaux solaires), la matière organique fraîche recharge le « niveau de charge » (Eh), tandis que la respiration et l'oxygène le déchargent (d'après Groeco / bioélectronique).

Ce que cette note couvre. On part de la **théorie** (qu'est-ce que Eh, pH, leur couplage), on en déduit les **implications pour le sol** (nutriments, micro-organismes, maladies), on explique **comment mesurer** ces paramètres, **quoi faire** en cas de valeurs inadéquates, et **dans quels contextes** cette connaissance est précieuse (diagnostic, restauration de friche). Un **suivi pluriannuel** chiffré et un **résumé simple** concluent.

¹Husson O. (2013), *Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems*, **Plant and Soil** 362 : 389–417.

2 Théorie (1) : l'oxydoréduction et le potentiel redox (Eh)

2.1 Réactions d'oxydoréduction : un échange d'électrons

Une réaction redox est un **transfert d'électrons** entre deux partenaires. Le moyen mnémotechnique classique :

Oxydation = **perte** d'électrons (et souvent gain d'oxygène, perte d'hydrogène).

Réduction = **gain** d'électrons (et donc gain d'énergie chimique).

L'**oxydant** est l'espèce qui capte les électrons ; le **réducteur** celle qui les cède.

Dans le sol, l'**oxygène** est l'accepteur d'électrons privilégié des micro-organismes : c'est l'oxydant « par défaut ». Quand l'oxygène manque (sol tassé, engorgé, inondé), les micro-organismes se rabattent sur d'autres accepteurs, dans un ordre précis que nous verrons. Les six éléments les plus impliqués dans la chimie du vivant ont justement une forte amplitude redox : C (de -IV dans CH₄ à +IV dans CO₂), N (de -III dans NH₄⁺ à +V dans NO₃⁻), S (de -II dans H₂S à +VI dans SO₄²⁻), ainsi que O, H et le fer Fe.

2.2 Définir et mesurer Eh : l'échelle des millivolts

Le **potentiel d'oxydoréduction** Eh mesure l'**intensité** avec laquelle un milieu attire ou cède des électrons. On l'exprime en **volts** (en pratique en **millivolts**), par rapport à une référence universelle : l'**électrode normale à hydrogène** (ENH), pour laquelle Eh = 0. On note donc les valeurs « mV/ENH ».

- Un **Eh élevé** (positif, p. ex. +600 mV) → milieu **oxydant**, pauvre en électrons disponibles.
- Un **Eh bas** (voire négatif) → milieu **réducteur**, riche en électrons disponibles.

Thermodynamiquement, le potentiel d'un couple oxydant/réducteur suit la **loi de Nernst** :

$$E_n = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{ox}]}{[\text{red}]} \quad [1]$$

où E^0 est le potentiel standard du couple, R la constante des gaz, T la température, n le nombre d'électrons échangés et F la constante de Faraday. La Équation 1 dit l'essentiel : **plus la forme oxydée domine, plus Eh monte.**

Eh est un potentiel, pas une quantité. Il indique la **tendance** (le « voltage »), non le nombre total d'électrons mobilisables. Pour ce dernier, on parle de **capacité de réduction** (réservoir d'électrons), portée surtout par la matière organique. Un sol peut afficher un Eh correct mais une faible **capacité tampon** : il dérive vite.

2.3 Au-delà de Eh seul : rH₂ et pe

Le Eh ne reflète pas **uniquement** l'activité électronique : il dépend aussi du pH (cf. S4). Pour caractériser l'état redox « absolu », indépendamment de l'acidité, les bioélectroniciens utilisent le **rH₂** (analogue du pH, mais pour l'hydrogène), et les géochimistes le **pe** (= -log de l'activité des électrons). On retiendra surtout une relation pratique de neutralité électronique : **pe + pH ≈ 7** en milieu équilibré (et la limite thermodynamique pe + pH = 14 dans l'eau).

3 Théorie (2) : le potentiel hydrogène (pH)

Le **pH** caractérise l'**activité des protons** H⁺. C'est la variable « maîtresse » historique de l'agronomie, car elle commande la solubilité de presque tous les éléments.

Termes descriptifs des plages de pH du sol (d'après Sparks, 2003)

Terme descriptif	Gamme de pH
Extrêmement acide	< 4,5
Très fortement à fortement acide	4,5 – 5,5
Modérément acide	5,6 – 6,0
Légèrement acide à neutre (optimum)	6,1 – 7,3
Légèrement à fortement alcalin	> 7,4

La gamme **pH 6–7** est optimale pour la mobilité des nutriments. C'est un fait bien connu des agriculteurs, qui chaulent pour maintenir leurs sols proches de la neutralité. Mais — c'est le cœur de cette note — **le pH ne suffit pas** : à pH égal, deux sols de Eh différents n'offrent pas la même chimie.

4 Théorie (3) : le couple Eh-pH, croix redox et diagrammes de Pourbaix

4.1 Pourquoi Eh et pH sont couplés

Beaucoup de réactions du sol échangent **simultanément** des protons et des électrons. En conséquence, Eh et pH sont **négativement corrélés** : dans un sol, quand le pH monte, le Eh tend à baisser, et inversement. À 25 °C, le couplage théorique vaut :

$$\frac{\Delta E_h}{\Delta \text{pH}} \approx -59 \text{ mV par unité de pH} \quad [2]$$

C'est l'idée de la « **croix redox** » (Figure 2) : un axe vertical (Eh, oxydation en haut / réduction en bas) et un axe horizontal (pH, acidification à gauche / alcalinisation à droite). Oxydation et acidification vont souvent de pair (coin haut-gauche), réduction et alcalinisation aussi (coin bas-droit).

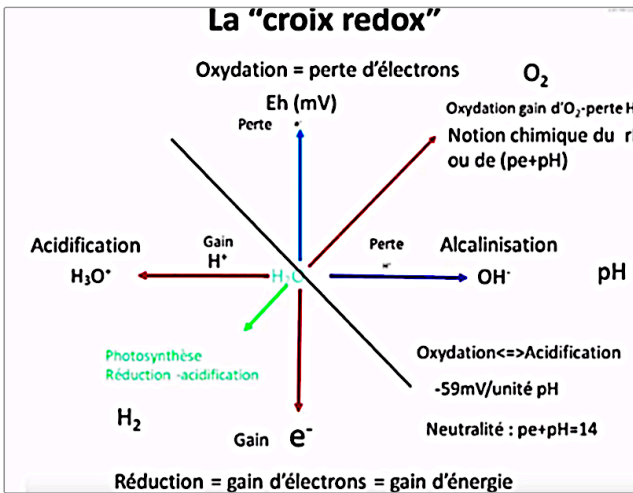


Figure 2. – La « croix redox » : l'axe vertical porte le Eh (oxydation = perte d'électrons en haut, réduction = gain d'électrons en bas), l'axe horizontal le pH (acidification à gauche, alcalinisation à droite). Le couplage vaut ≈ -59 mV par unité de pH.

4.2 Les diagrammes de Pourbaix : la carte d'identité chimique d'un élément

Un **diagramme de Pourbaix** (ou diagramme Eh-pH) représente, dans le plan (pH, Eh), les **domaines de stabilité** des différentes formes chimiques d'un élément. C'est une **carte** : à chaque couple (pH, Eh) correspond la forme qui prédomine. L'exemple du **fer** (Figure 3) est emblématique : la forme soluble et assimilable Fe^{2+} n'existe que dans une fenêtre Eh-pH bien définie ; ailleurs, le fer précipite en oxydes/hydroxydes insolubles (carence).

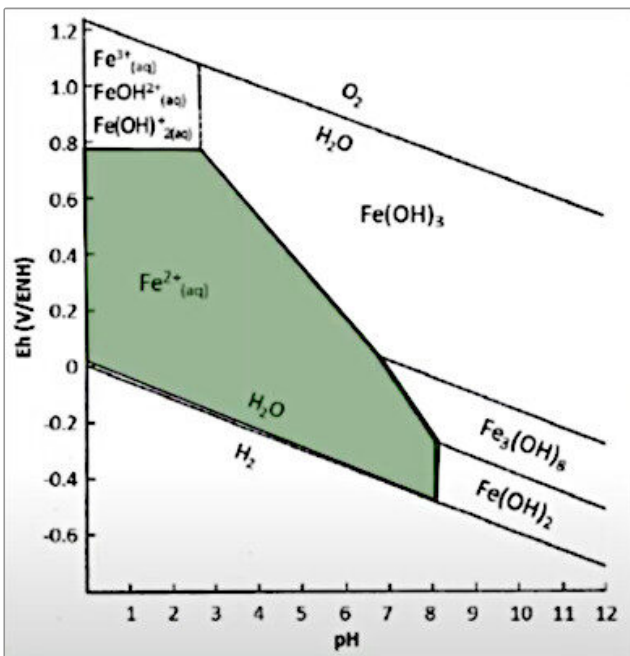


Figure 3. – Diagramme de Pourbaix (Eh-pH) du fer. La zone verte = domaine de la forme soluble Fe^{2+} (assimilable). En conditions oxydées/alcalines, le fer précipite en $Fe(OH)_3$ insoluble : la chlorose ferrique des sols calcaires s'explique ici.

Lire un diagramme de Pourbaix. Les lignes obliques (pente ≈ -59 mV/pH) séparent des formes qui échangent **protons**

+ **électrons** ; les lignes verticales séparent des formes qui n'échangent que des **protons** (dépendent du seul pH) ; les horizontales, que des **électrons** (dépendent du seul Eh). Les deux droites vertes encadrant le diagramme ($PO_2 = 1$ bar en haut, $PH_2 = 1$ bar en bas) bornent le domaine de stabilité de l'eau.

5 Théorie (4) : Eh-pH dans la cellule et la plante

L'oxydoréduction n'est pas qu'une affaire de sol : c'est le **moteur énergétique de la cellule**. La photosynthèse **réduit** le CO_2 en sucres (stockage d'électrons et d'énergie) ; la respiration **oxyde** ces sucres (libération d'énergie). Chaque organe vit à un Eh propre, et la cellule dépense beaucoup d'énergie à maintenir son **homéostasie redox**. Un déséquilibre brutal (sur-oxydation) endommage protéines, ADN et membranes — c'est le **stress oxydatif**.

À l'échelle de la plante entière, Husson propose une hypothèse forte : chaque **compartiment** fonctionne dans une fenêtre Eh-pH spécifique (apoplaste, xylème, phloème), et la plante **modifie activement** le Eh-pH de sa rhizosphère (par exsudats racinaires, sélection de micro-organismes) pour rester dans sa zone de confort.

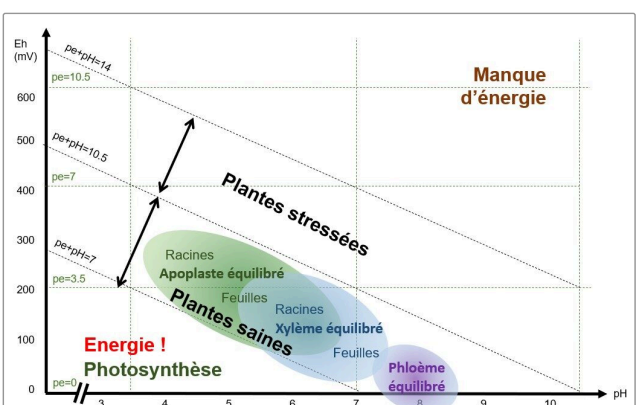


Figure 4. – Fenêtres Eh-pH des compartiments de la plante (apoplaste, xylème, phloème, racines et feuilles). En bas à gauche (réduit, acide, riche en énergie) : **plantes saines**. En haut à droite (oxydé, manque d'énergie) : **plantes stressées** (d'après Husson).

À retenir

Plante saine = plante « chargée ». Les conditions favorables sont **réduites et légèrement acides** (énergie disponible, issue de la photosynthèse). Les plantes **stressées** glissent vers le coin **oxydé** : tout stress (hydrique, carence, pesticide, blessure) se traduit en **stress oxydatif** et déplace le Eh-pH des tissus.

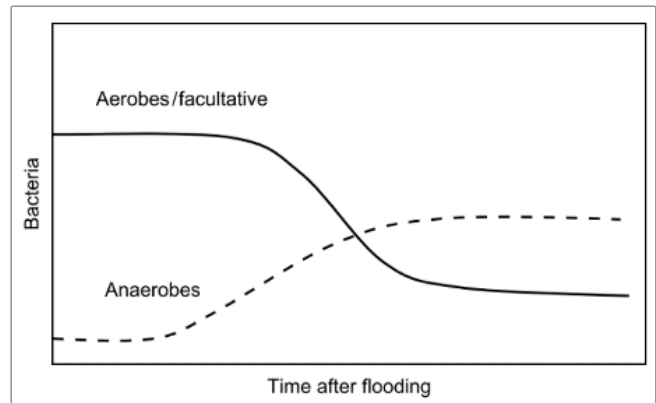
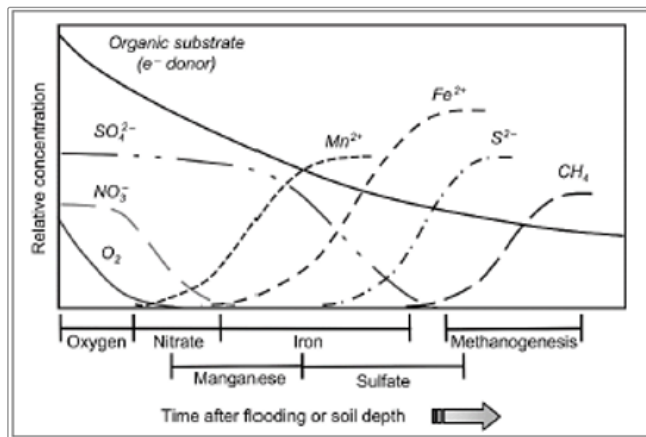


Figure 5. – À gauche : concentrations relatives des accepteurs d'électrons après inondation (O₂, puis NO₃⁻, Mn, Fe, SO₄²⁻, puis CH₄). À droite : bascule des populations bactériennes aérobies vers les anaérobies (Reddy & DeLaune, 2008).

6 Implications (1) : Eh-pH et fonctionnement du sol

6.1 Valeurs typiques et classes de Eh

Le Eh d'un sol fluctue normalement entre **-300 et +900 mV/ENH**. Les sols cultivés **aérobies** se situent le plus souvent entre **+300 et +500 mV**. On classe les sols ainsi :

Principales classes de Eh des sols (Reddy & DeLaune, 2008)	
Terme descriptif	Eh (mV/ENH)
Sols oxydés (aérobies)	> +400
Sols modérément réduits	+100 à +400
Sols réduits	-100 à +100
Sols fortement réduits (engorgés)	-300 à -100

Pour la **croissance des plantes**, l'optimum se situe entre **+350 et +450 mV/ENH** (Husson, 2013). En dessous de +350 mV, la croissance s'atténue fortement (photosynthèse et activités enzymatiques ralenties).

Forte variabilité de Eh. Le Eh varie dans l'espace (jusqu'à 100–200 mV entre le centre et la périphérie d'un agrégat de quelques mm !), avec la profondeur, et dans le temps (cycle journalier, saisons, pluies). C'est pourquoi **un seul chiffre ne veut rien dire** : il faut un protocole rigoureux et des mesures répétées (cf. §8).

6.2 La séquence des accepteurs d'électrons

Quand un sol s'engorge, l'oxygène est consommé en quelques heures, puis les micro-organismes utilisent successivement, **par Eh décroissant**, d'autres accepteurs d'électrons. Cette « cascade » est universelle (Figure 5) :

Occurrence des réactions redox par Eh décroissant (après inondation)	
Réaction	Fenêtre de Eh (mV/ENH)
Disparition de l'O ₂	≈ +400 et au-dessus
Réduction des nitrates NO ₃ ⁻ → N ₂ , N ₂ O	+200 à +400

Réduction du manganèse Mn ⁴⁺ → Mn ²⁺	+200 à +300
Réduction du fer Fe ³⁺ → Fe ²⁺	-100 à +100
Réduction des sulfates SO ₄ ²⁻ → S ²⁻ , H ₂ S	-100 à 0
Méthanogenèse (CO ₂ → CH ₄)	< -150

6.3 Disponibilité des nutriments : le vrai enjeu agronomique

Eh et pH commandent ensemble la **forme chimique** des éléments, donc leur **solubilité** et leur **assimilabilité**. C'est l'implication la plus directement utile au jardinier.

Azote (N) — En conditions **oxydées**, l'azote est nitrate NO₃⁻ (mobile, lessivable). En conditions **réduites**, il bascule en ammonium NH₄⁺ (retenu sur le complexe argilo-humique). La forme absorbée (NH₄⁺ vs NO₃⁻) modifie en retour le pH de la rhizosphère. L'optimum de croissance correspond souvent à une nutrition **mixte** — précisément la transition NH₄⁺ / NO₃⁻ (vers pH 6,5–7, Eh ≈ 400 mV).

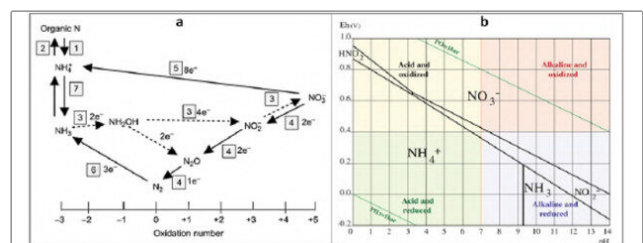


Figure 6. – Oxydoréduction de l'azote. (a) Réseau des réactions (degré d'oxydation de -III à +V). (b) Diagramme de Pourbaix de N : NO₃⁻ domine en conditions oxydées (Eh > 500 mV), NH₄⁺ en conditions réduites/modérées (Husson, 2013 ; Reddy & DeLaune, 2008).

- **Fer (Fe) et manganèse (Mn)** : présents en milieu oxydé sous forme d'oxydes **insolubles** ; leur **réduction** (Eh bas) les rend solubles et assimilables. Trop de réduction → **toxicité** ferreuse/manganique ; trop d'oxydation à pH élevé → **carence** (chlorose ferrique des sols calcaires).
- **Phosphore (P)** : ne change pas de degré d'oxydation, mais son sort dépend **indirectement** du Eh-pH, via le fer, l'aluminium et le calcium auxquels il s'associe. La biodis-

ponibilité maximale se situe vers **pH 6-7** (Figure 7) ; la réduction du fer libère le P qui lui était lié.

- **Soufre (S)** : sulfate SO_4^{2-} (assimilable) en milieu oxydé ; sa réduction en H_2S (Eh très bas) est **toxique** — propre aux sols engorgés.
- **Micronutriments (Cu, Zn, Mo, B...)** : chacun a sa fenêtre ; les carences apparaissent surtout aux **pH élevés** (Cu, Zn, Fe, Mn) ou aux Eh inadéquats.

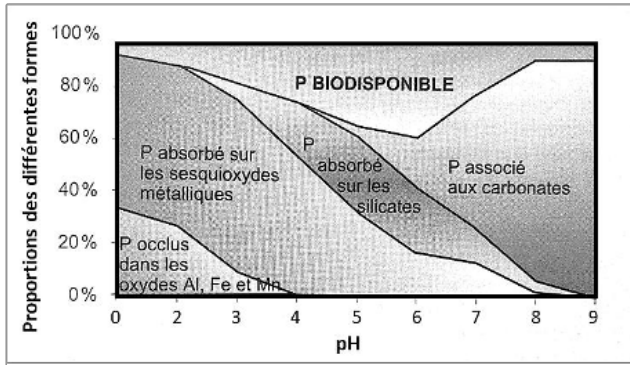


Figure 7. – Répartition des formes de phosphore selon le pH. La fraction **biodisponible** est maximale autour de pH 6-7 ; elle chute en sol acide (fixation sur oxydes de Fe/Al) comme en sol calcaire (phosphates de calcium peu solubles) (Sharpley & Moyer, 2000).

6.4 La matière organique : la « batterie » du sol

La matière organique (MO) est le **réservoir d'électrons** du sol : elle peut être réduite et oxydée de façon réversible par les micro-organismes (« navette » d'électrons). Un apport de MO fraîche **abaisse et tamponne** le Eh (la décomposition consomme l'oxygène) et ramène le pH vers la neutralité. C'est le levier n°1 pour **piloter** le couple Eh-pH. À l'inverse, un sol pauvre en MO est **oxydé**, peu tamponné, et dérive au moindre stress — d'où un cercle vicieux de dépendance aux intrants.

Les **biostimulants fermentés** (litière forestière fermentée, bokashi, purins) que Canopée fabrique vont exactement dans ce sens : ils apportent une flore **réductrice** et de la matière fraîche qui **recharge la batterie** du sol. Voir la note technique NT-P1-01 « Biostimulants fermentés ».

6.5 Eh-pH, bioagresseurs et santé des plantes

Comme les plantes, **chaque micro-organisme** (y compris pathogène) et **chaque ravageur** est adapté à une fenêtre Eh-pH restreinte. Constat majeur : la grande majorité des champignons et bactéries **phytopathogènes**, ainsi que les insectes, attaquent préférentiellement des **plantes oxydées** (stressées). Une plante qui maintient son homéostasie (conditions **réduites**, légèrement acides) est **peu sensible** aux maladies et aux ravageurs.

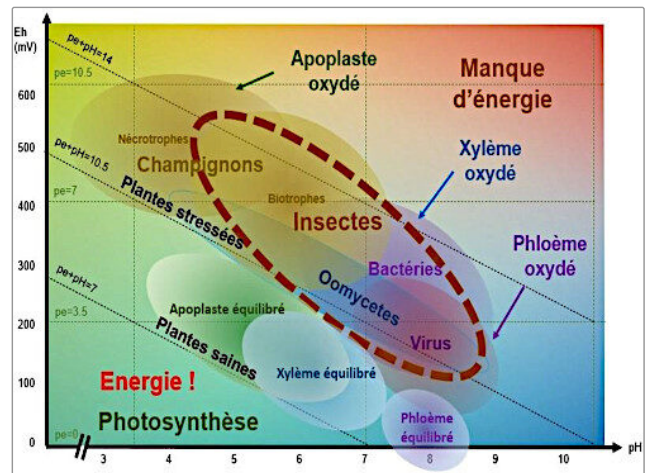


Figure 8. – Fenêtres Eh-pH favorables aux bioagresseurs (champignons, insectes, bactéries, oomycètes, virus). Tous ciblent des compartiments oxydés de la plante. Le maintien de conditions réduites/équilibrées (bas à gauche) est **prophylactique** (Husson et al.).

Une lecture nouvelle de la « théorie de la trophobiose ».

Les stress (hydrique, carenciel) et la plupart des intrants de synthèse (engrais, pesticides) sont **oxydants**. Ils déplacent la plante vers le coin oxydé... c'est-à-dire vers les conditions que **préfèrent les bioagresseurs**. La lutte chimique par « sur-oxydation » peut ainsi entretenir le problème qu'elle prétend résoudre.

6.6 Synthèse : la zone des conditions favorables

Toutes ces contraintes (disponibilité des nutriments, risques de toxicité, de carence, de maladies) se superposent dans un **seul diagramme Eh-pH** de synthèse (Figure 9). Il en ressort une **zone favorable** étroite, autour de **pH 6,5-7** et **Eh 400-450 mV**, où tous les nutriments sont disponibles, les toxicités minimales, et les bioagresseurs défavorisés.

7 Implications (2) : où se situent les sols réels ?

À grande échelle, l'ensemble des sols du globe se confine dans une **enveloppe** du plan Eh-pH (Figure 10). Les sols « **normaux** » (aérobies, cultivés) forment un nuage serré vers pH 4-8 et Eh +300 à +600 mV ; les sols **humides** puis **engorgés** (*waterlogged*) s'en écartent vers les Eh bas. La trajectoire de **genèse** d'un sol (podzolisation, calcimagnésique, hydro-morphe, sulfaté acide) se lit aussi sur ce plan.

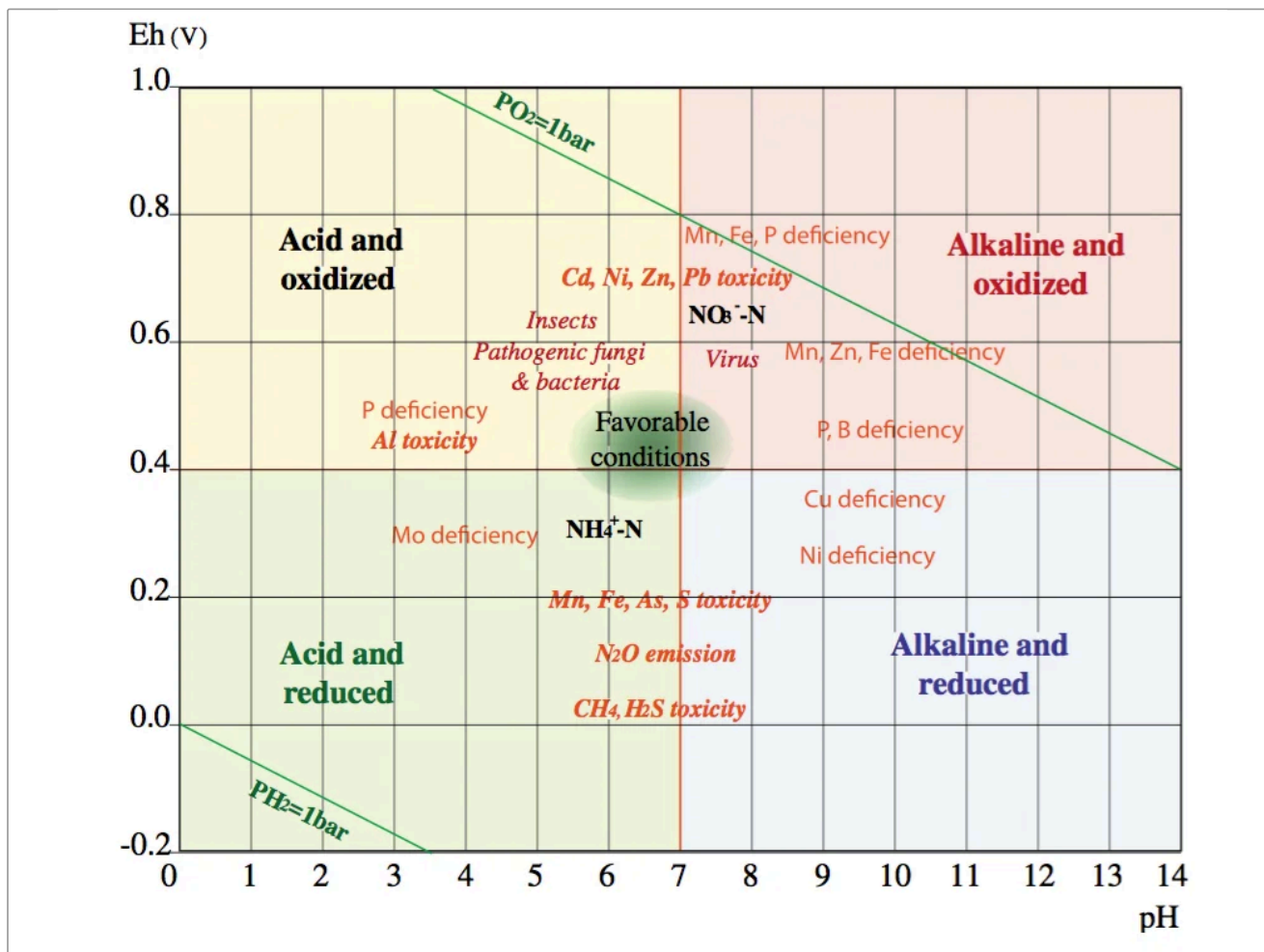


Figure 9. – Diagramme de synthèse Eh-pH : contraintes agronomiques et estimation des conditions optimales de croissance. La zone « Favorable conditions » (vert) se situe à pH 6,5–7 et Eh ≈ 400–450 mV/ENH, à la transition $\text{NO}_3^- / \text{NH}_4^+$. Hors zone : carences (alcalin/oxydé), toxicités métalliques (acide), maladies (oxydé), émissions de N_2O et CH_4 (réduit) (adapté de Husson, 2013).

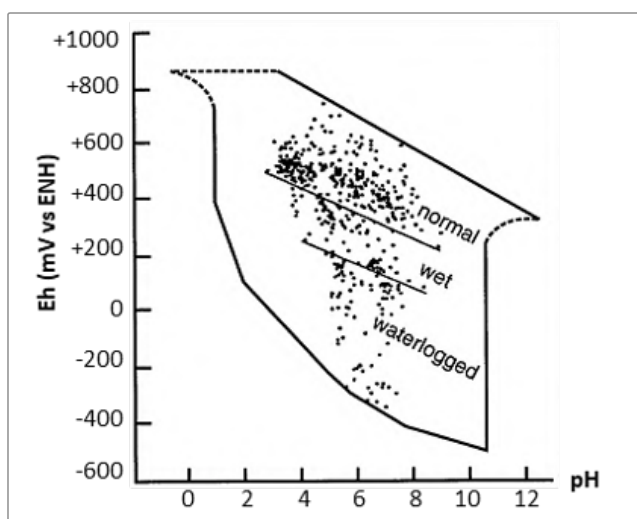


Figure 10. – Enveloppe des couples Eh-pH mesurés sur sols réels. Les sols « normaux » occupent un nuage resserré ; les sols humides (wet) puis engorgés (waterlogged) glissent vers les Eh bas (d'après Baas Becking et al. ; Sparks, 2003).

8 Mesurer Eh et pH précisément

8.1 Le pH : simple et fiable

Le pH se mesure aisément, sur une **suspension de sol** (p. ex. 1 volume de terre fine pour 2,5 volumes d'eau déminéralisée, après agitation et repos), avec un **pH-mètre** électronique étalonné (solutions tampon pH 4 et 7) ou, à défaut, du papier pH. On distingue le **pH eau** (le plus courant) du **pH KCl** (plus acide de 0,5 à 1 unité, révèle l'acidité d'échange). Toujours préciser la méthode.

8.2 Le Eh : délicat, à manier avec méthode

La mesure du Eh est **le point dur**. Elle se fait avec un **millivoltmètre** relié à deux électrodes : une **électrode métallique** (platine, qui capte le potentiel des électrons) et une **électrode de référence** (Ag/AgCl). Trois difficultés : la **qualité des électrodes** (encrassement, polarisation), la **forte variabilité** du Eh, et sa **dépendance au pH**. D'où une règle d'or :

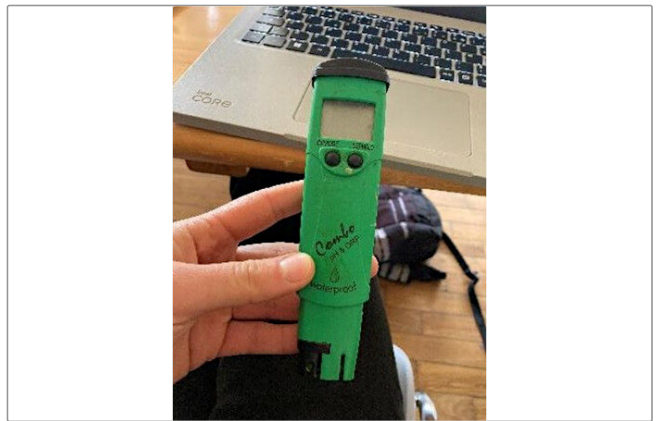


Figure 11. – Matériel d'entrée de gamme : à gauche, un testeur ORP/redox de poche (Extech RE300) ; à droite, un testeur combiné pH + ORP. Pour un usage rigoureux, on préfère un millivoltmètre de laboratoire avec électrode Pt et électrode de référence séparées.

À retenir

Ne jamais donner un Eh sans le pH correspondant. Les deux se lisent ensemble, et la comparaison entre mesures n'a de sens qu'à pH précisé. Un Eh « brut » isolé est ininterprétable.

dans la terre, ou sur suspension de terre) renseigne sur le **mi-lieu**. Les deux sont complémentaires ; cette note vise surtout le **sol**, mais le matériel et les corrections sont identiques.

Étalonnage et corrections (protocole de terrain)

Le protocole de référence en agroécologie (Ver de Terre Production / Maraîchage Sol Vivant) prévoit, **une fois par jour de mesure** :

Protocole d'étalonnage et de mesure du Eh (d'après Ver de Terre Production)	
Étape	Opération
1 — Étalonnage	Tremper les deux électrodes dans la solution tampon « 220 mV / pH 7 » ; lire la valeur attendue dans le tableau du flacon selon la température .
2 — Écart	Noter l'écart voltmètre / valeur théorique pour le retrancher (ou l'ajouter) à chaque mesure. Au-delà de 10 mV d'écart : nettoyer la platine (papier abrasif grain 2000) ou regarnir l'électrode (KCl 3M saturé en AgCl).
3 — Pont salin	Filtre humide imbibé d'eau déminéralisée + quelques gouttes de KCl 3M diluée à 0,1M (pas la solution saturée).
4 — Lecture	Plusieurs mesures (2-3) ; retenir la valeur la plus basse atteinte avant remontée (ou la médiane du plateau).
5 — Correction de référence	Ajouter le potentiel de l'électrode de référence pour se ramener à l'ENH : ≈ +209 mV à 25 °C pour une Ag/AgCl en KCl 3M (valeur à ajuster avec la température).



Figure 12. – Mesure de terrain : la sonde est mise en contact intime avec le sol en place, le millivoltmètre affichant directement la valeur en mV.

Où, quand, combien de mesures ?

Bonnes pratiques d'échantillonnage Eh-pH	
Question	Recommandation
Où	Profondeur fixe et répétable (p. ex. 10 et 20 cm) ; plusieurs points par parcelle (le Eh varie fortement à courte distance).
Quand	Toujours à humidité comparable ; idéalement avant et après la période culturale, à date fixe d'une année sur l'autre.
Combien	Au moins 3 répétitions par point ; noter systématiquement température, humidité du sol et heure.

Eh du sol ou Eh de la sève ? La méthode Ver de Terre mesure souvent le Eh (et le pH) sur **tissu végétal frais** (la plus jeune feuille adulte, roulée et piquée par l'électrode) — un diagnostic de l'état de la **plante**. La mesure **sur sol** (sonde enfoncée

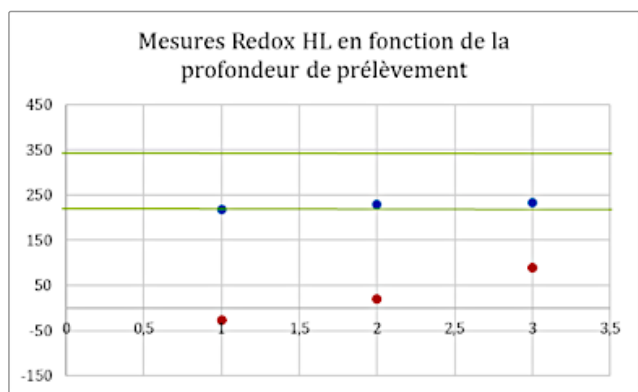


Figure 13. – Exemple de relevé : Eh en fonction de la profondeur de prélèvement. La variabilité verticale (et entre répétitions) impose de fixer la profondeur et de répéter.

l'eau que dans l'air) : ce sont autant de **boutons de réglage** du couple Eh-pH.

À retenir

Le bon indicateur de robustesse : le ratio MO % / argile %. Au-dessus de **17 %**, le sol tamponne bien Eh, pH, eau et température, et devient **suppressif** des bioagresseurs. En dessous de **12 %** (cas de la majorité des sols cultivés), le sol est fragile, peu productif sans intrants, sensible à l'érosion. Régénérer un sol, c'est avant tout **remonter ce ratio**.

9 Actions correctrices : revenir vers la zone cible

La plupart des sols cultivés dérivent vers le coin **oxydé** (et souvent acide) : c'est le déséquilibre le plus fréquent. Plus rarement (sols lourds, bas-fonds, sur-irrigation), le problème est **l'excès de réduction** (engorgement). Les leviers :

Leviers de correction du couple Eh-pH selon le déséquilibre		
Déséquilibre	Diagnostic Eh-pH	Actions correctrices
Sol suroxydé (le plus courant)	Eh > 500–550 mV	Apports de MO fraîche (compost jeune, BRF, fumier, biostimulants fermentés) ; couverture permanente du sol (couverts, mulch) ; réduction du travail du sol ; allongement des rotations ; arrêt des intrants oxydants.
Sol trop réduit (engorgé)	Eh < +100 mV, odeurs de H ₂ S	Drainage , décompaction, aération ; éviter le tassement et la sur-irrigation ; planches surélevées ; cultures adaptées en attendant.
Trop acide	pH < 5,5	Amendement basique (chaux, dolomie) en visant pH 6,5 ; la MO tamponne aussi vers la neutralité.
Trop alcalin / calcaire	pH > 7,5, chlorose	Apports de MO ; matériaux acidifiants (soufre) ; choix d'espèces tolérantes ; fer chélaté en correctif ponctuel.

Les pratiques agroécologiques agissent toutes sur le Eh-pH. Le travail du sol et les passages d'engins (structure, diffusion de l'oxygène), les amendements organiques (réservoir d'électrons, tampon de pH), la couverture et la diversité végétale (recharge en électrons via la photosynthèse), l'irrigation/le drainage (l'oxygène diffuse 10 000 fois plus lentement dans

10 Contextes d'application

- **Diagnostic d'une parcelle.** Un point Eh-pH situe immédiatement la parcelle sur le diagramme de synthèse : oxydée ? acide ? carencée ? Cela oriente les corrections **avant** de semer.
- **Restauration d'une friche / d'un sol dégradé.** Le suivi Eh-pH année après année **objective** la régénération : on visualise la trajectoire qui ramène le sol vers la zone cible (cf. §10). C'est un indicateur de progrès plus fin que le seul rendement.
- **Lutte prophylactique contre les bioagresseurs.** Maintenir la plante et le sol en conditions **réduites et légèrement acides** défavorise champignons, bactéries et insectes : une protection « par l'équilibre » plutôt que par la chimie.
- **Sols hydromorphes et zones humides.** Le Eh identifie les horizons réduits (taches d'oxydoréduction, gley) et guide le drainage ou, au contraire, la préservation d'une zone humide.
- **Pilotage de la fertilisation.** Choisir la forme d'azote (NH₄⁺ vs NO₃⁻) en cohérence avec le Eh-pH visé, et anticiper la disponibilité du P, du Fe, du Mn.

11 Mettre en place un suivi plurianuel

L'intérêt opérationnel du couple Eh-pH se révèle **dans la durée**. On propose de relever Eh et pH à **date fixe** — typiquement **au printemps** (avant la période culturale) et **à l'automne** (après) — et de **reporter chaque mesure** sur deux graphes complémentaires.

11.1 Le plan Eh-pH avec « zone cible » et seuils d'alerte

Le premier graphe (Figure 14) place chaque relevé dans le plan Eh-pH, sur lequel on a tracé une **zone cible** (« sweet spot » : pH 6,5–7, Eh 400–450 mV) et les zones d'alerte alentour. La **trajectoire** des points, mesure après mesure, montre si la parcelle se rapproche ou s'éloigne de l'équilibre.

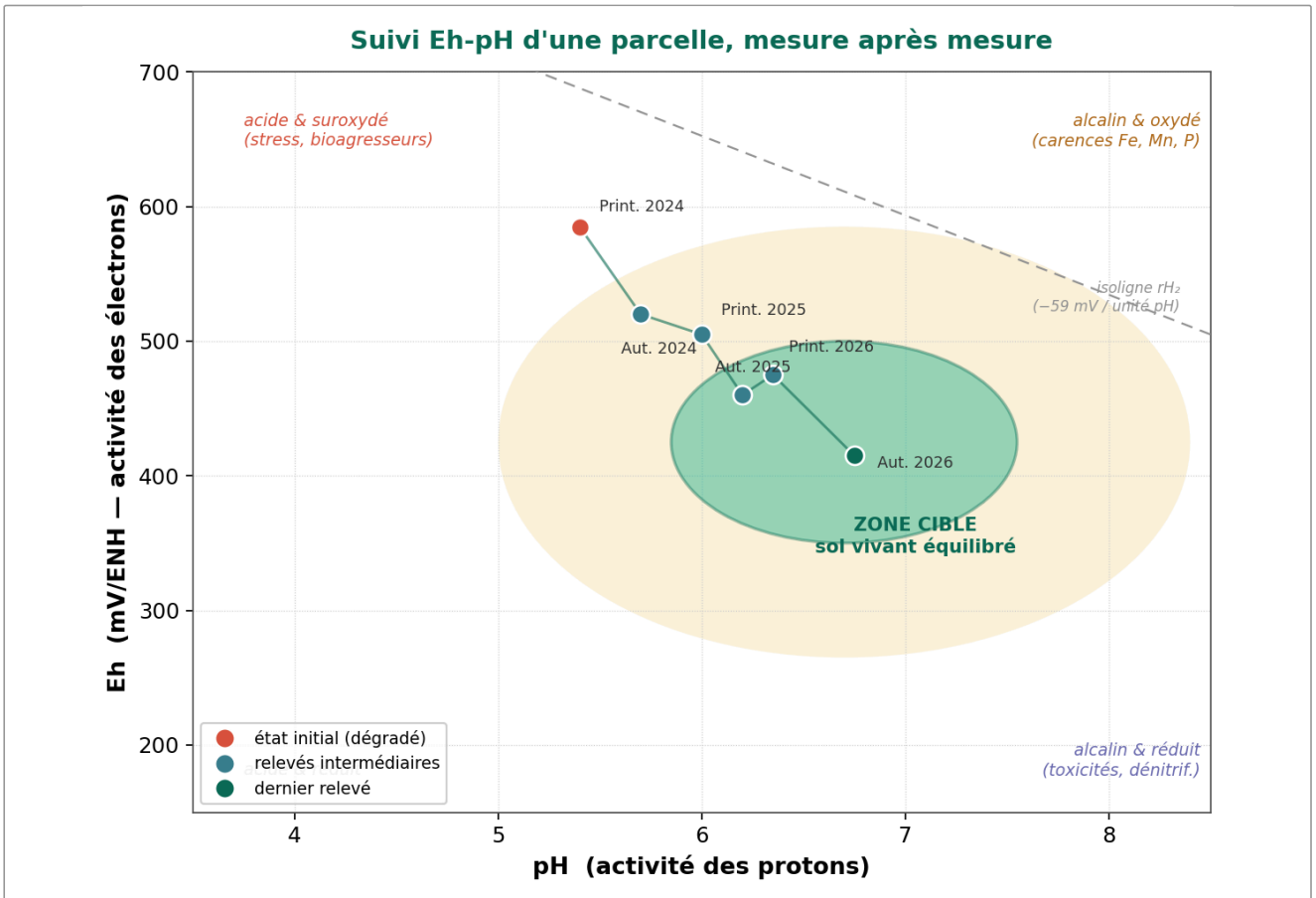


Figure 14. – Suivi Eh-pH d'une parcelle (données illustratives). Chaque point est un relevé (printemps / automne). Le sol part d'un état acide et suroxydé (rouge) et, sous l'effet des apports de MO et de la couverture, sa trajectoire rejoint la zone cible (vert). Gabarit à remplir avec les mesures réelles.

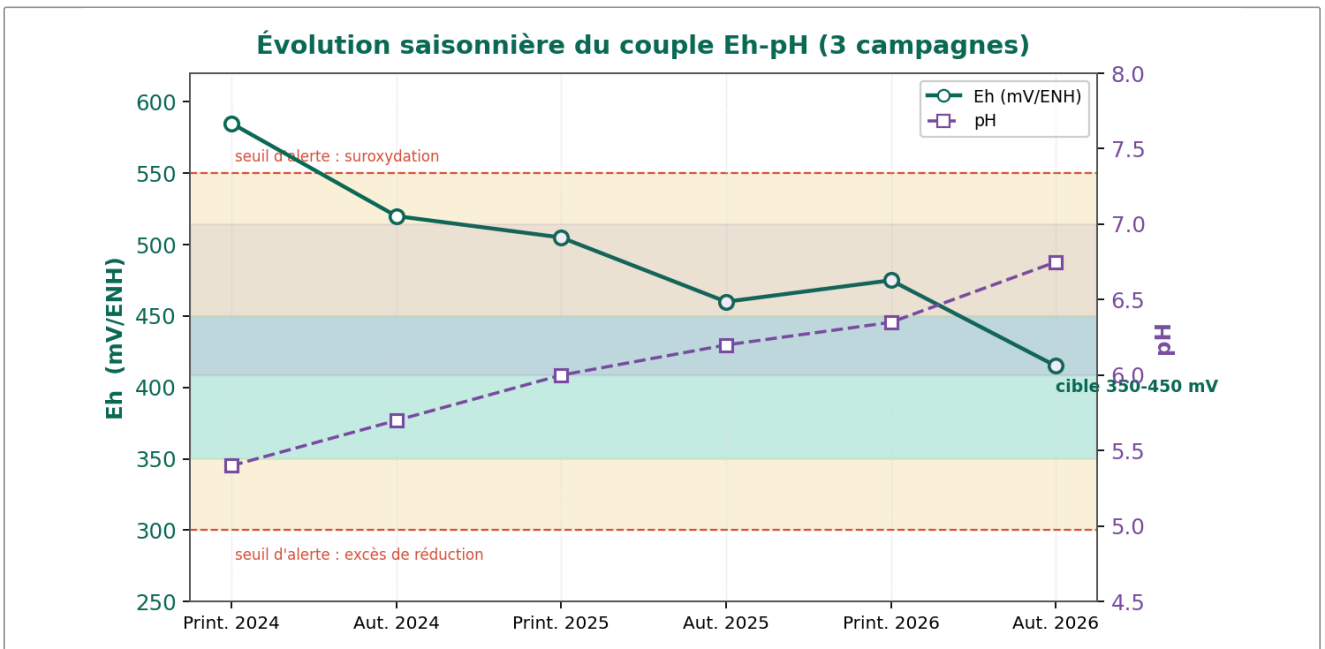


Figure 15. – Évolution saisonnière du couple Eh-pH (données illustratives) : le Eh (vert) redescend progressivement de la zone d'alerte « suroxydation » vers la bande cible, tandis que le pH (violet) remonte vers 6-7. Gabarit à alimenter.

11.2 Le suivi temporel : Eh et pH au fil des saisons

Le second graphe (Figure 15) suit Eh et pH dans le temps, avec une bande cible (Eh 350–450 mV) et des seuils d'alerte (suroxydation au-dessus de 550 mV, excès de réduction en

dessous de 300 mV). C'est le tableau de bord saison par saison.

Ces deux graphes sont produits par le script `NT_P1_redox_calc.py` livré avec la note. Il suffit d'y **remplacer le jeu de données illustratif** par les relevés réels de la parcelle (date, pH, Eh) et de recompiler (just note `NT_P1_redox`) pour mettre le tableau de bord à jour.

12 TL;DR – l'essentiel en valeurs cibles

À retenir — version courte

Deux flux gouvernent le sol : les **électrons** (Eh, oxydoréduction) et les **protons** (pH, acidité). On les lit **toujours ensemble**.

Visez la zone cible (sol cultivé aérobie) :

- **pH ≈ 6,5 – 7** (légèrement acide à neutre) ;
- **Eh ≈ 400 – 450 mV/ENH** (modérément oxydé).

Seuils d'alerte :

- **Eh > 550 mV** → sol **suroxydé** : carences, stress, bioagresseurs favorisés ;
- **Eh < 300 mV** → sol **trop réduit** : engorgement, toxicités (Fe, Mn, H₂S) ;
- **pH < 5,5** → trop acide (toxicité Al, blocage du P) ;
- **pH > 7,5** → trop alcalin (chlorose ferrique, blocage des oligo-éléments).

Le levier n°1 : la **matière organique** (recharge la « batterie », tamponne Eh-pH). Surveillez le ratio **MO % / argile %** : viser **> 17 %**, alerte **< 12 %**.

Règle pratique : **plante saine = sol réduit et légèrement acide**. Tout stress (et la plupart des intrants de synthèse) **oxyde** — et l'oxydation profite aux maladies.

Tableau de bord : valeurs cibles et seuils

Paramètre	Zone cible	Alerte basse	Alerte haute
pH	6,5 – 7	< 5,5	> 7,5
Eh (mV/ENH)	400 – 450	< 300	> 550
MO % / argile %	> 17 %	< 12 %	—

13 Limites, précautions et mise en œuvre à Canopée

13.1 Ce que le cadre Eh-pH ne dit pas

Le couple Eh-pH est un **cadre de lecture** puissant, mais ce n'est ni une mesure miracle ni une science figée. Quelques garde-fous s'imposent avant d'en tirer des décisions.

Précautions d'interprétation.

- La mesure du **Eh sur sol aérobie** reste **difficile et peu reproductible** : la littérature elle-même est prudente. Un chiffre

isolé ne vaut rien — seules comptent les **tendances**, à protocole et humidité constants.

- Eh et pH sont **interdépendants** : ne jamais conclure sur l'un sans l'autre.
- Le cadre « plante saine = milieu réduit et acide » est une **hypothèse intégratrice** (Husson) confortée par de nombreux faits, mais encore **débatue** en recherche. À manier comme une **boussole**, pas comme une loi exacte.
- Les **valeurs cibles** (pH 6,5–7, Eh 400–450 mV) sont des **ordres de grandeur** pour la plupart des cultures ; certaines espèces (myrtille, riz, plantes de landes...) font exception.

13.2 Une démarche progressive, adaptée à une association

Inutile d'investir d'emblée dans un équipement de laboratoire. La connaissance fine du couple Eh-pH se construit **par étapes**, à la mesure des moyens de Canopée.

Montée en compétence par paliers

Niveau	Moyens	Ce qu'on en tire
1 — Découverte	papier pH + testeur ORP de poche	premier repérage acide/alcalin, oxydé/réduit ; sensibilisation en atelier
2 — Suivi	pH-mètre + redox-mètre à électrodes séparées, étalonnés	relevés fiables, comparables d'une saison à l'autre (cf. graphes §11)
3 — Diagnostic	protocole rigoureux, répétitions, journal de bord partagé	trajectoire pluriannuelle des parcelles, pilotage des amendements

Valoriser la mesure en collectif. Un seul jeu d'électrodes, **mutualisé** entre jardiniers, suffit pour une campagne de mesures sur l'ensemble des parcelles louées. La séance de mesure devient un **atelier de formation** : on y relie le ressenti de terrain (sol qui « sent mauvais », croûte de battance, cultures qui peinent) aux chiffres Eh-pH, et l'on décide ensemble des apports de matière organique. C'est l'occasion idéale d'articuler cette note avec la fabrication de **biostimulants fermentés** (NT-P1-01), qui rechargent concrètement la « batterie » du sol.

À retenir

À retenir en une phrase. Mesurer Eh et pH, c'est se donner un **tableau de bord électro-chimique** du sol : il ne remplace pas l'observation, mais il l'objective et permet de **suivre dans le temps** le retour d'une parcelle vers la vie.

14 Références et pour aller plus loin

14.1 Référence scientifique centrale

- **Husson O.** (2013), *Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisci-*

plinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy, Plant and Soil 362 : 389–417. [doi:10.1007/s11104-012-1429-7](https://doi.org/10.1007/s11104-012-1429-7) — article fondateur, en accès libre ; source de la plupart des diagrammes Eh-pH de cette note.

- **Husson O., Sarthou J.-P., Duru M.** (2023), *Référentiels et nouveaux indicateurs pour fonder une agriculture régénératrice, Agronomie, environnement et sociétés.*
- **Cottes J. J.-G.** (2019), *Le couple Eh/pH du sol : sa mesure, son impact sur la mobilité des nutriments et la croissance du tournesol*, mémoire de thèse, Sciences de la Terre, INPT (Toulouse).
- **Reddy K. R., DeLaune R. D.** (2008), *Biogeochemistry of Wetlands*, CRC Press — classes de Eh, séquence des accepteurs d'électrons.
- **Sparks D. L.** (2003), *Environmental Soil Chemistry*, Academic Press — plages de pH, disponibilité des nutriments, enveloppe Eh-pH des sols.

14.2 Synthèses et vulgarisation

- **Solagro / Osez l'agroécologie** — synthèse technique « Le potentiel d'oxydo-réduction. Potentiel d'oxydo-réduction, potentiel hydrogène, quel impact sur la qualité d'un sol ? » : osez-agroecologie.org
- **Ver de Terre Production** — « Le potentiel redox : la vie est un petit courant électrique alimenté par le soleil » et **Protocole et étalonnage des appareils de mesure du Eh-redox** (Maraîchage Sol Vivant) : verdeterreprod.fr
- **Triple Performance** — fiche « Potentiel RedOx » : wiki.tripleperformance.fr
- **APAD** — Association pour la Promotion d'une Agriculture Durable : apad.asso.fr
- **Vertal** — « Le couple pH-redox des sols et des cultures » : vertal.fr
- **Agro-League** — « Le potentiel redox du sol influence la croissance de la plante » (épisode 1) et « Le redox, le paramètre oublié des maladies fongiques » (épisode 2) : agro-league.com
- **Timac Agro** — « Le potentiel redox du sol, indicateur clé de la santé de votre culture » : timacagro.com
- **CERFRANCE Normandie-Maine** — « Potentiel redox, pH du sol et des plantes et pratiques agricoles » : normandiemaine.cerfrance.fr
- **Chambre d'agriculture de la Drôme** — « Le potentiel redox, un atout caché sous nos pieds » : agriculture-dromoise.fr

14.3 Normes et matériel de mesure

- **ISO 11271** — Qualité du sol : détermination du potentiel d'oxydoréduction (méthode de terrain) : iso.org
- Notices : **Extech RE300 ExStik** (mesure ORP/redox) et **Extech pH100** (pH-mètre) ; électrode de platine + électrode

de référence Ag/AgCl (KCl 3M saturé en AgCl), millivolt-mètre type WTW ProfiLine pH 3110.

14.4 Lien interne

- **NT-P1-01** — « **Biostimulants fermentés** » (Canopée) : litière forestière fermentée, bokashi et purins, qui rechargent le sol en flore réductrice et abaissent le Eh — application directe des leviers décrits ici.

Suivi des versions

Version	Date	Auteur	Modifications
A	06-06-2026	OLT	Création : panorama théorique (Eh, pH, couple Eh-pH, croix redox, Pourbaix, homéostasie) ; implications sol (nutriments, accepteurs d'électrons, MO, bioagresseurs, conditions favorables) ; protocole de mesure ; actions correctrices ; contextes d'application ; suivi pluriannuel (2 figures Python) ; TL;DR avec valeurs cibles.