



Prendre en compte tous les indicateurs de l'acidité des sols pour l'interprétation et le conseil

Groupe Chaulage Article

Auteurs : Bruno Félix-Faure ⁽¹⁾, Matthias Carrière ⁽²⁾, Sébastien Kalt ⁽³⁾,

⁽¹⁾ GALYS (siège social) - 14 rue André Boulle - 41000 Blois :

bruno.felixfaure@galys-laboratoire.fr

⁽²⁾ SAS Laboratoire / AGRO-Systèmes – 270 avenue de la Pomme de Pin – 45160 ARDON

mcarriere@agro-systemes.com

⁽³⁾ LCA (siège social) La Rochelle ZI Chef de Baie - 1 rue Champlain 17074 La Rochelle

sebastien.kalt@laboratoirelca.com

L'analyse de terre est un outil indispensable pour appréhender le statut acido-basique d'un sol. Plusieurs paramètres analytiques servent d'indicateurs de l'acidité d'un sol. En cas de chaulage, les composantes physiques (granulométrie) et biologiques (teneur en matières organiques) sont indispensables dans le calcul des doses d'apports d'amendements minéraux basiques (AMB). D'autres éléments comme le système de culture, la profondeur de sol de la couche travaillée, le pourcentage de cailloux sont également à prendre en compte pour le calcul et le choix des optimums visés.

Nous allons étudier la pertinence des divers indicateurs de l'acidité des sols et leur prise en compte dans le conseil de chaulage.

La présentation s'articule autour de quatre points,

- 1^{er} point : Les indicateurs de l'acidité,
- 2^{ème} point : Parmi ces indicateurs lesquels sont les plus pertinents,
- 3^{ème} point : Dans certaines situations, des cas de discordance entre indicateurs peuvent s'observer. Quelles en sont les causes possibles ?
- 4^{ème} point et conclusion : Quels sont les éléments à prendre en compte pour raisonner le chaulage, notamment dans des situations où les indicateurs de l'acidité présentent une discordance ?

I. Les indicateurs de l'acidité :

a) Le pH_{eau} :

- La mesure du pH consiste à mesurer la concentration en ions H⁺ (un H⁺ = protons), soit $\text{pH}_{\text{eau}} = -\log_{10} [\text{H}^+]$.

Au laboratoire cette mesure se réalise avec 1 volume de sol dans 5 fois son volume d'eau. Le sol est séché et tamisé à 2 mm. La norme implique 1 h d'agitation, puis attente de 1h avant mesure au pH mètre (à 20 °C).

En France nous utilisons le paramètre pH_{eau}. Nos voisins européens utilisent le pH_{CaCl2}.

Dans le sol, les flux de protons sont permanents et le pH en est donc la résultante.

La production de protons (H⁺) par les différentes réactions biologiques du sol est très active là où se trouvent localisées la matière organique et l'activité racinaire.

- Le sol, grâce à son pouvoir tampon, va s'opposer à ces variations de pH (élévation de pH suite à un chaulage, diminution de pH suite à des phénomènes d'acidification).

L'argile et la matière organique constituent le principal pouvoir tampon d'un sol dans une gamme de pH_{eau} entre 5,5 à 7,0. Les charges négatives de la CEC Metson sont en grande partie constituées par celles de l'argile et celles de la matière organique. La CEC est donc un bon estimateur du pouvoir tampon d'un sol dans cette gamme de pH_{eau} .

En sol calcaire (pH_{eau} supérieur à 7,0), les carbonates vont également jouer ce rôle de pouvoir tampon et en sol acide (pH_{eau} inférieur à 5,5), l'altération des argiles (minéraux aluminosilicates) libère de l'aluminium échangeable qui joue également ce rôle de pouvoir tampon. (Voir figure 1).

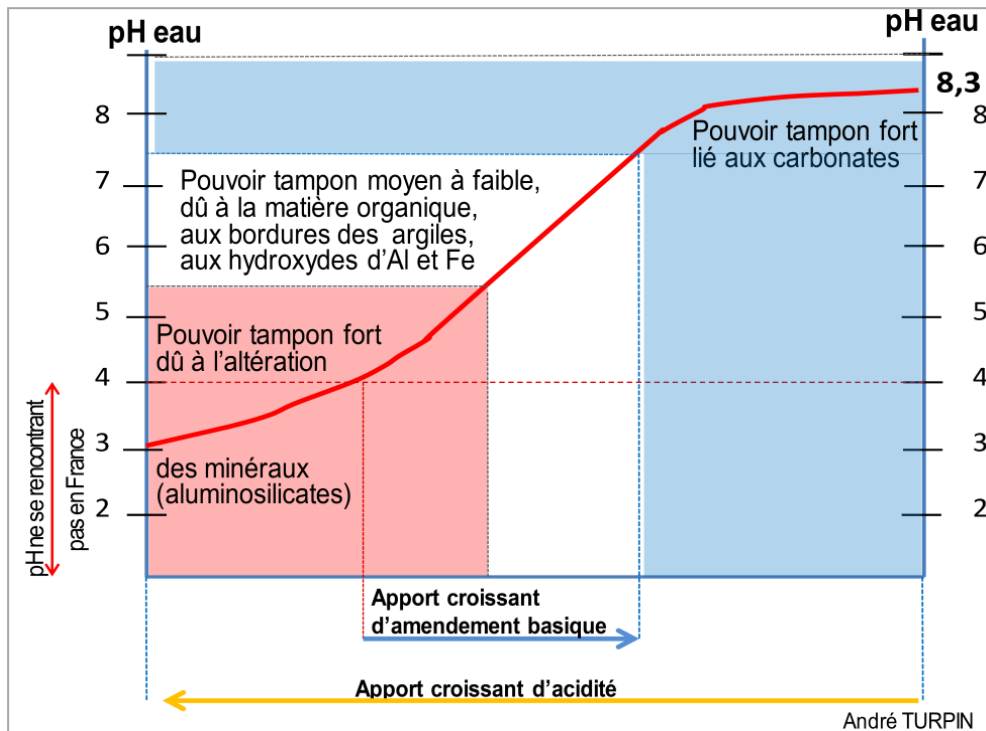


Figure 1 : Pouvoirs tampon des sols s'opposant à l'élévation ou la diminution de leur pH_{eau} .

- Le pH_{eau} subit une variation saisonnière qui peut être importante.

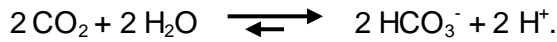
Un suivi mensuel du pH du sol a été réalisé par la coopérative Maisadour (département 40) et le laboratoire GALYS, sur une parcelle du Sud-Ouest en sol limoneux, à faible teneur en matière organique (MO = 13 g/kg), conduite en monoculture de maïs grain irriguée. (Voir figure 2).

Ce suivi montre que cette variation peut aller jusqu'à 1 point de pH dans les sols peu tamponnés (sol à faible CEC). Dans le cas présent la CEC Metson est de 72 meq/kg. Le pH_{eau} et le pH_{KCl} apparaissent plus élevés en période hivernale (températures basses). Inversement, ils diminuent lors du printemps. Leurs valeurs s'abaissent pour atteindre un minimum en juin, puis restent basses l'été, période où la parcelle est irriguée, pour remonter relativement rapidement en fin d'automne.

Quelles explications apporter à ces observations ?

Les mois de printemps, d'été et d'automne sont des périodes où l'augmentation de la température du sol entraîne une relance de l'activité biologique.

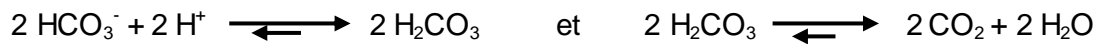
La respiration des microorganismes et des racines libère du gaz carbonique (CO_2) qui augmente la concentration en acide carbonique de la solution du sol :



En conséquence, le pH_{eau} (et le pH_{KCl}) diminuent.

L'irrigation permet de maintenir l'activité biologique du sol durant l'été et, pour cette raison, les pH conservent des valeurs basses.

Cette acidification n'est pas durable. Lorsque l'activité biologique ralentie lors de la baisse des températures à l'entrée de l'hiver, progressivement l'acide carbonique se rééquilibre avec l'atmosphère :



En conséquence, le pH remonte.

Cette remontée peut être partielle. En effet, s'il y a lixiviation des ions hydrogénocarbonates (HCO_3^-), cette acidification est alors pérennisée.

Des phénomènes en lien avec la fertilisation azotée sur culture de maïs peuvent également expliquer la baisse des pH en fin de printemps.

Sur maïs, la majeure partie de l'apport azoté se réalise sur mai – juin.

La nitrification de cet azote (apporté sous forme d'urée) entraîne lors de cette phase une acidification :

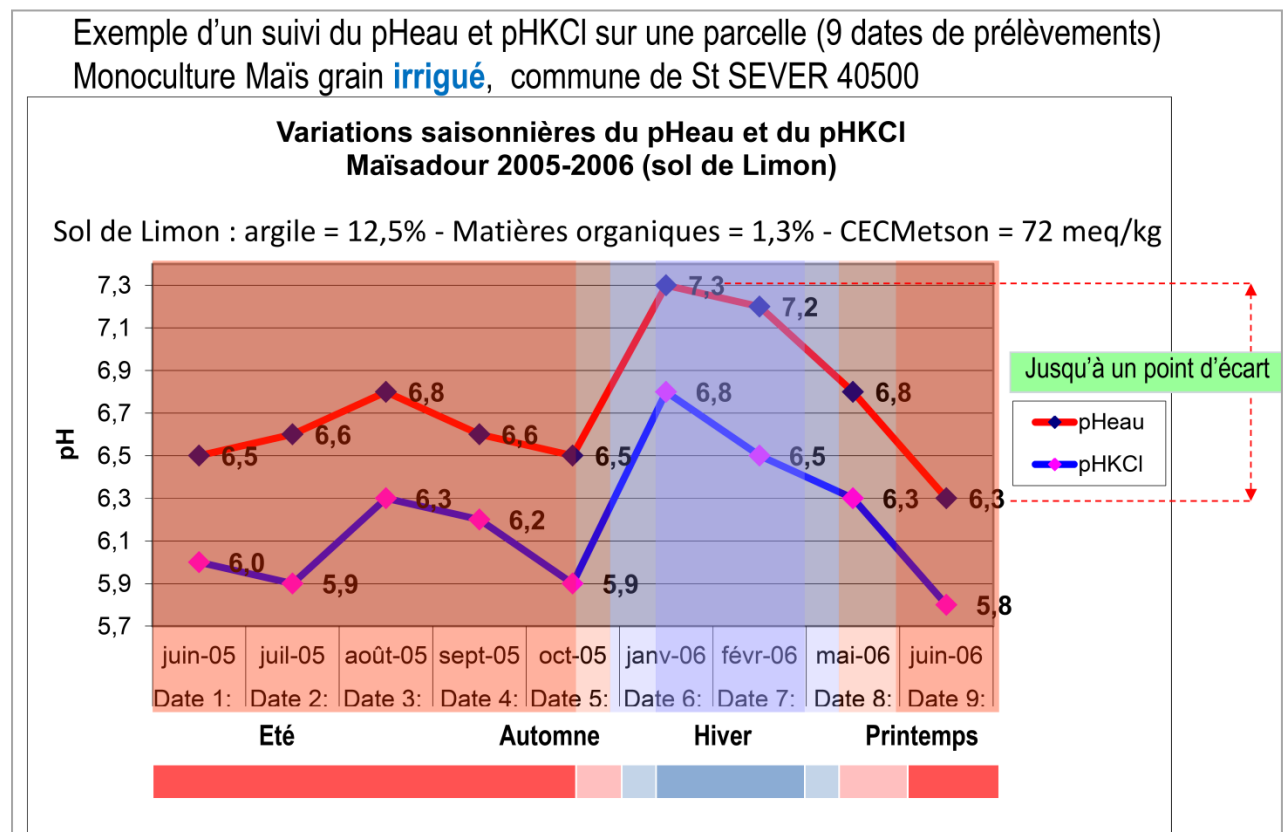


Figure 2 : Exemple de variation saisonnière du pH_{eau} et du pH_{KCl} .

b) Le pH_{KCl} :

- Sa mesure laboratoire correspond à celle du pH_{eau} réalisée avec 1 volume de sol dans 5 fois son volume d'une solution de chlorure de potassium (KCl) à 1 mol/l.

Le pH_{KCl} subit une variation saisonnière identique au pH_{eau} .

Il est faux de dire que le pH_{KCl} indique la valeur minimale que le pH_{eau} atteindra après acidification.

Les sols français présentent un pH_{KCl} toujours inférieur au pH_{eau} . Cette différence est de l'ordre de 0,5 à 1,0 point. Lorsque les 2 mesures sont réalisées, les laboratoires s'en servent de test de cohérence.

- Les études de la relation pH_{KCl} en fonction du pH_{eau} mettent en évidence la très bonne corrélation entre ces 2 indicateurs.

L'étude réalisée à partir des analyses de terre de l'année 2012 de la coopérative AXERREAL (région Centre : départements 41, 45, 36, 18), montre l'excellente relation existant entre ces 2 paramètres ($R^2 = 0,955$). La différence entre pH_{eau} et pH_{KCl} est autour de 1 point.

En sols calcaires l'écart entre les 2 pH tend à se resserrer. Les sols très acides correspondent ici en majorité à des sols sableux (Sologne). (Voir figure 3)

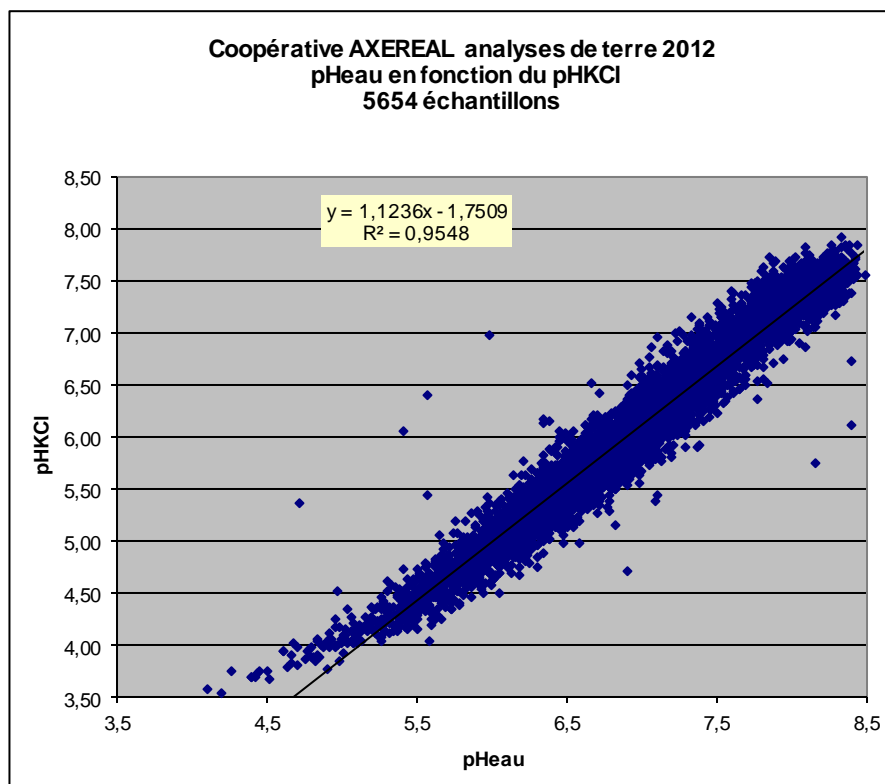


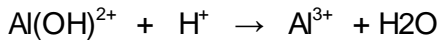
Figure 3 : Corrélation entre pH_{eau} et pH_{KCl} , zone centre (départements 41, 45, 36, 18) coopérative AXERREAL – laboratoire GALYS

c) L'Aluminium échangeable (Al. éch.) (mg/kg ou cmol+/kg) :

- La méthode analytique consiste en une extraction dans une solution de KCl, puis une titration ou une mesure par spectrométrie. Ce dosage n'est pas réalisé en routine par les laboratoires, mais fait partie de certains menus d'analyse de terre dont les prélèvements proviennent de zones à sol acide.

- Lorsque le pH_{eau} prend des valeurs inférieures à 5,8 – 5,5 les composés aluminiques subissent une dissolution (cas des argiles ou phyllosilicates d'aluminium, oxydes ou hydroxyde d'aluminium).

Cette dissolution entraîne une libération dans la solution d'ions d'aluminium :



Les ions Al^{3+} , plus facilement échangeables, peuvent prendre les places occupées par les cations Ca^{2+} et Mg^{2+} sur le système adsorbant. Ces ions Al^{3+} sont toxiques pour les racines. Le seuil de toxicité aluminique se situe autour de 50 mg d'aluminium échangeable/kg.

- L'aluminium échangeable se complexe avec la matière organique et sous cette forme est non toxique. Plus la matière organique est abondante, plus ce phénomène est important, expliquant ainsi que dans certains sols très acides à forte teneur en matière organique, les phénomènes de toxicité aluminique ne sont pas visibles.

Dans ces sols à teneur élevée en matière organique, la solution de KCl extrait l'aluminium échangeable, plus une fraction de l'aluminium complexé par la matière organique.

Il ne serait pas faux de placer le seuil de toxicité aluminique un peu au-delà de 50 mg/kg dans ces sols acides riches en matière organique, mais il est difficile d'apprécier la réelle part de cet aluminium séquestré par les matières humiques et finalement extraite par la solution de KCl. Le seuil de 50 mg/kg reste la valeur retenue dans toutes les situations.

- La toxicité aluminique se traduit par une croissance des racines réduite, des racines peu ramifiées et aux extrémités renflées.

- **Exemple de toxicité aluminique :**

Sur une parcelle située à proximité d'Albi (81) en culture Blé dur, des problèmes de zones avec dépérissement puis disparition de la majorité des plantes sont apparus.

3 échantillons de terre sont prélevés début du mois de mai :

- Une **zone 1** : "Rien ne pousse", où les pieds de blé ont en majorité disparu ou sont de petites tailles, avec un système racinaire réduit. Il faut noter l'absence de développement d'adventices. (*Voir photo 1*).
- Une **zone 2** : "Blé + folle avoine", où les pieds de blé ont quasiment tous disparu, mais avec un développement important de folle avoine.
- Une **zone 3** : "bon blé dur", où le blé se développe correctement.

La zone 1 correspond à une zone de toxicité aluminique, avec un pH_{eau} de 4,7 et une teneur en aluminium échangeable de 74,4 mg/kg. Cette valeur est largement au-dessus de la teneur seuil de toxicité de 50 mg/kg. La teneur en matière organique de 20,8 g/kg est considérée comme normale et n'entraîne pas (ou très faiblement) de phénomène de séquestration de cet aluminium échangeable, d'où une toxicité qui s'exprime pleinement par la disparition de la culture.

La zone 2 avec un pH_{eau} de 5,4 et une teneur en aluminium de 40,2 mg/kg est très proche du seuil de toxicité aluminique. Il est fort probable que la folle avoine plus rustique résiste à cette toxicité, alors que le blé dur supporte plus difficilement une telle teneur, d'où sa disparition.

La zone 3 avec un pH_{eau} de 5,9 et une teneur en aluminium de 6,5 mg/kg ne présente pas de risque de toxicité aluminique et le blé dur s'y développe correctement.

Cet exemple met en évidence la très forte relation entre le pH_{eau} et la teneur en aluminium échangeable, avec confirmation de cette valeur seuil de pH_{eau} 5,5 en-dessous de laquelle s'observent une augmentation exponentielle de la teneur en aluminium échangeable et donc des risques de toxicité aluminique (*Voir tableau 1*).

Référence échantillon	Zone prélèvement	Sable Grossier g/kg	Sable Fin g/kg	Limon Grossier g/kg	Limon Fin g/kg	Argile g/kg	Matière Organique g/kg	CEC Metson meq/kg	pHeau	pHKCl	CaO mg/kg	Ca/CEC %	S/CEC %	Al éch mg/kg
Bon blé dur	Zone 1	331	221	128	133	178	19,2	92	5,9	5,1	1257	48	60	6,5
Blé + folle avoine	Zone 2	293	160	109	118	297	17,6	155	5,4	4,4	1558	34	40	40,2
Rien ne pousse	Zone 3	247	243	130	149	211	20,8	97	4,7	4,3	480	18	20	74,4

Tableau 1 : Résultats analytiques des 3 analyses de terre prélevées sur 3 zones d'une parcelle à proximité d'Albi (81).



Photo 1 :
Zone 1 avec disparition de la culture de blé dur.

- L'augmentation des teneurs en aluminium échangeable de façon exponentielle lorsque les pH descendent en-dessous de 5,5 a été mis clairement en évidence. En se basant sur une **étude des sols réalisée dans le département de la Loire** (42) par le laboratoire SAS-Agrosystème, cette relation entre pH_{eau} et teneur en aluminium échangeable est confirmée, dans un contexte de sols avec de fortes (voire très fortes) teneurs en matières organiques. (Voir figure 4).

Sur 302 analyses, 52 échantillons ont une teneur en aluminium échangeable supérieure à 50 mg/kg, soit 17 %. Sur l'ensemble des parcelles analysées :

- 94 % présentent une teneur en matière organique > 3 %
- 48 % présentent une teneur en matière organique > 5 %

- **La neutralisation de l'Al échangeable** : Dans des situations de sols très acides, le calcul du Besoin En Base (BEB) se devrait d'intégrer à la fois le BEB_1 pour neutraliser l'aluminium échangeable et le BEB_2 pour remonter le pH_{eau} ou le taux de saturation (selon la méthode de calcul utilisée).

- Exemple (TURPIN 2013) : un sol avec une teneur de 100 mg d' Al^{3+} échangeable / kg de terre.

Masse molaire de l'aluminium = 27 g.mol⁻¹

Soit 100 / 27 millimoles d' Al^{3+} / kg = 3.7 millimoles d' Al^{3+} / kg

Ce qui correspond à 3.7 * 3 millimoles de charges positives / kg

Soit 11.11 millimoles de charges positives / kg

Pour chacune de ces millimoles de charge positive, il faut 1 millimole HO^- pour la neutraliser.
Or 1 millimole de CaO apporte 2 millimoles HO^-

Il faut donc : $(11.11 \text{ millimoles de CaO / kg}) / 2 = 5.555 \text{ millimoles de CaO / kg}$

Masse molaire de CaO = $(40 + 16) \text{ g.mol}^{-1} = 56 \text{ g.mol}^{-1}$

Soit $(5.555 * 56) \text{ mg CaO / kg} = 311.11 \text{ mg CaO / kg}$

Pour éliminer $100 \text{ mg / kg d'Al}^{3+}$ il faut donc $311 \text{ mg de CaO / kg}$

Ainsi il est possible de donner la formule suivante pour le calcul de la neutralisation de l'aluminium échangeable :

$$\bullet \text{BEB}_1 = (\text{teneur aluminium échangeable mg/kg}) \times 3,11 \times 10^{-3} \times (\text{Poids de Terre fine en T/ha})$$

Soit si la masse de terre par hectare est estimée à 3000 T :

$$\text{BEB}_1 = 100 \times 3,11 \times 10^{-3} \times 3000 = 933 \text{ unités Valeur Neutralisante / ha}$$

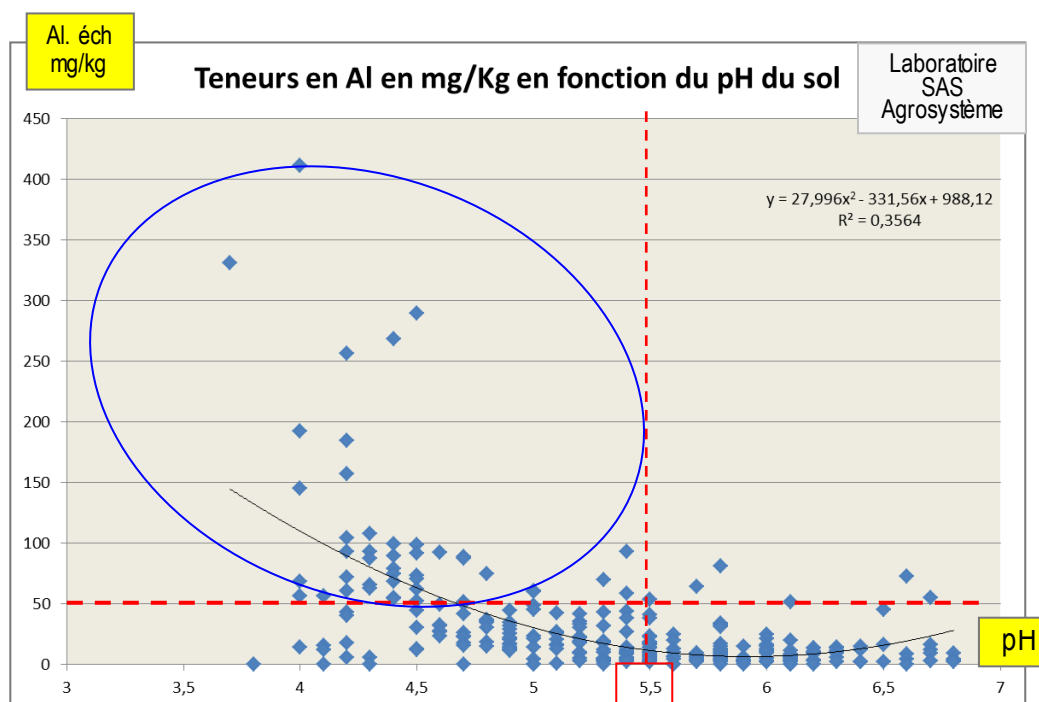


Figure 4 : Teneurs en aluminium échangeable en fonction du pH_{eau} pour 302 échantillons prélevés dans le département de la Loire (42) (Etude laboratoire SAS – Agrosystème)

• En l'absence de mesure de la teneur en aluminium échangeable, le pH_{eau} est bien entendu l'indicateur indispensable dans le diagnostic du risque de toxicité aluminique, mais la prise en compte du type de sol et du taux de matière organique permet également d'affiner ce diagnostic.

A partir des résultats de 2150 analyses de terre réalisées sur les différents terroirs de la coopérative Maisadour (départements 33, 40, 64) avec le laboratoire GALYS sur les années 2011 et 2012, il est mis en avant la grande variabilité des teneurs en matière organique (MO). La figure 5 fait apparaître que certains sols ont des teneurs très élevées en MO ($\text{MO} > 3\%$). Ces sols correspondent à des sables noirs (teneur en argile faible) et à des sols de Touya (sols limoneux à forte teneur en MO).

La figure 6, qui correspond au nuage de points des pH_{eau} en fonction des teneurs en argile, permet de visualiser le lot des analyses de terre prélevées en sol sableux et avec des pH_{eau}

très acides, inférieurs à 5,5. Bien que très acides, ces sols ont un risque de toxicité aluminique très faible, car leur faible taux d'argile (ou phyllosilicates d'aluminium) ne génère que très peu d'aluminium échangeable, même en sol très acide.

Ce risque s'avère encore moindre pour les sables noirs, dont les teneurs en matière organique (MO) sont élevées (> 3%), car l'aluminium échangeable se trouve alors séquestré par cette MO et donc sous une forme non toxique.

Figure 5 :

Etude réalisée sur les terroirs de la coopérative Maisadour avec le laboratoire GALYS : taux de matière organique en fonction de la teneur en argile.

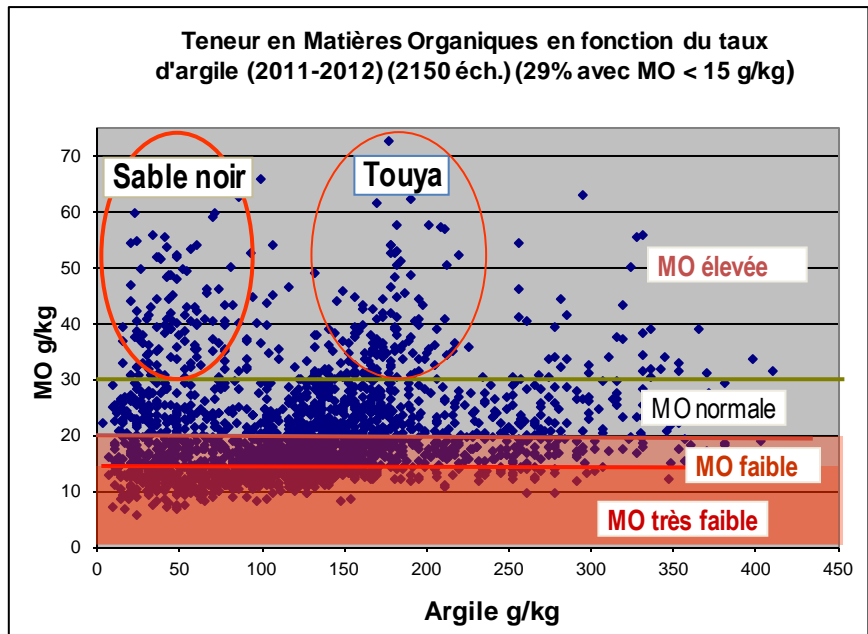
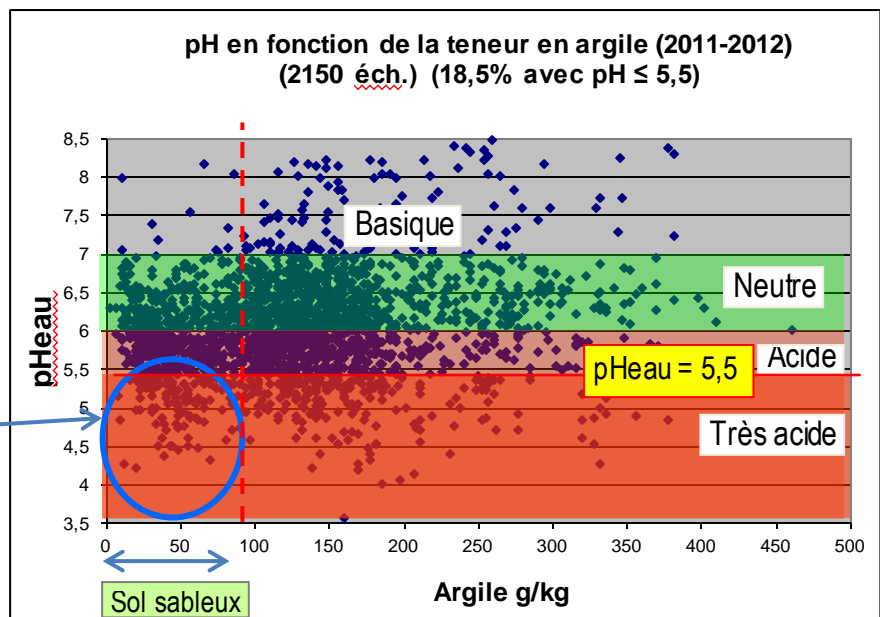


Figure 6 :

Etude réalisée sur les terroirs de la coopérative Maisadour avec le laboratoire GALYS : pH_{eau} en fonction de la teneur en argile. Le cercle bleu visualise les sols qui, bien qu'étant très acides, présentent peu de risque de toxicité aluminique.



d) Le taux de saturation : $S/CEC = \text{Somme des cations} / \text{CEC Metson (en \%)}$

- Cet indicateur nécessite le dosage des cations échangeables (Calcium, Magnésium, Potassium, Sodium) et la mesure de la CEC selon la méthode Metson (réalisée à $pH 7,0$ et non au pH du sol).

Le sodium n'est pas toujours réalisé et, dans ce cas, est considéré comme négligeable.

Le taux de saturation est couramment réalisé par les laboratoires.

A l'aide de l'exemple ci-dessous, il est détaillé comment se réalise le calcul du taux de saturation (S/CEC%). Voir tableau 2.

CALCUL S/CEC%	Parcelle : « Prat Vemec » – GAEC de Kermaria – 29140 TOURC'H					
Paramètres analytiques	pHeau	CEC Metson meq/kg	CaO mg/kg	MgO mg/kg	K2O mg/kg	Na2O mg/kg
Ref analyse : 2012006099	6,2	154	2240	85	126	0
Coefficient passage au meq/kg			0,0357	0,0496	0,0213	0,032
Cation exprimés en meq/kg			Ca++ meq/kg	Mg ++ meq/kg	K+ meq/kg	Na+ me/kg
			79,97	4,22	2,68	-
Somme des cations meq/kg	86,87					
S/CEC %	56					

Tableau 2 : exemple de calcul du taux de saturation.

• Etude de la relation pHeau et S/CEC

▪ pH_{eau} et S/CEC sont assez bien corrélés. Les sols très acides sont désaturés avec des S/CEC très faibles. Inversement, les sols calcaires (même très légèrement) sont saturés avec des taux de saturation supérieurs à 100% (quelques g/kg de $CaCO_3$ suffisent pour avoir S/CEC > 100 %). En-dessous de pH 7,0 le dosage classique des carbonates (calcaire total) n'est pas suffisamment sensible pour quantifier une présence éventuelle de carbonate. Ces carbonates résiduels, qui peuvent éventuellement être présents, se quantifient alors en mg/kg et nécessitent une méthode particulière (J.Y Baliteau 2009).

Exemple de la relation pH_{eau} et S/CEC (voir tableau 3)

Réf. analyse	2012086589	2012016055	2011101207	2012016068	2012038754
Code postal-Commune	56110 LE SAINT	29140 TOURC'H	29100 POULDERGAT	56520 GUIDEL	29750 LOCTUDY
pHeau	4,4	5,7	6,1	6,9	7,3
CaO mg/kg	344	1000	1779	1744	4466
CEC meq/kg	134	128	116	90	157
S/CEC %	15	33	64	81	112
CaCO3 total g/kg	0	0	0	0	4,1

Tableau 3 :

Relation pH eau et S/CEC : 5 analyses de terre en provenance des départements 29 et 56.

▪ Il faut noter que dans certains sols particuliers, la teneur élevée en magnésium échangeable (MgO), contribue de façon importante à la saturation de la CEC Metson. Dans l'exemple ci-dessous, le magnésium échangeable représente 12% de la CEC et le calcium échangeable 69%.

Réf. analyse	Code postal-Commune	pHeau	CaO mg/kg	MgO mg/kg	CEC meq/kg	S/CEC %	CaCO3 total g/kg
2013035504	59163 THIVENCELLE	6,3	5977	773	307	84	0

▪ Une étude réalisée à partir de 5 654 échantillons prélevés sur l'année 2012, en provenance de la coopérative AXEREAAL (Région Centre, départements 18-28-36-37-41-45) a permis d'étudier la relation pH_{eau} en fonction de S/CEC.

► Une 1^{ère} approche est réalisée avec l'ensemble des échantillons sous forme de "nuage de points". La dispersion assez importante rend peu discernable la corrélation pH_{eau} – S/CEC. La présence de 23% de sols calcaires (Calcaire total > 5g/kg) explique le fort pourcentage d'analyses avec S/CEC > 100%. En effet, 47,5% des analyses ont des S/CEC > 100 % et la majeure partie de ces analyses correspond à des sols calcaires, seulement 15% de ces analyses ont leur teneur en CaCO3 total = 0 g/kg. (Voir Figure 7).

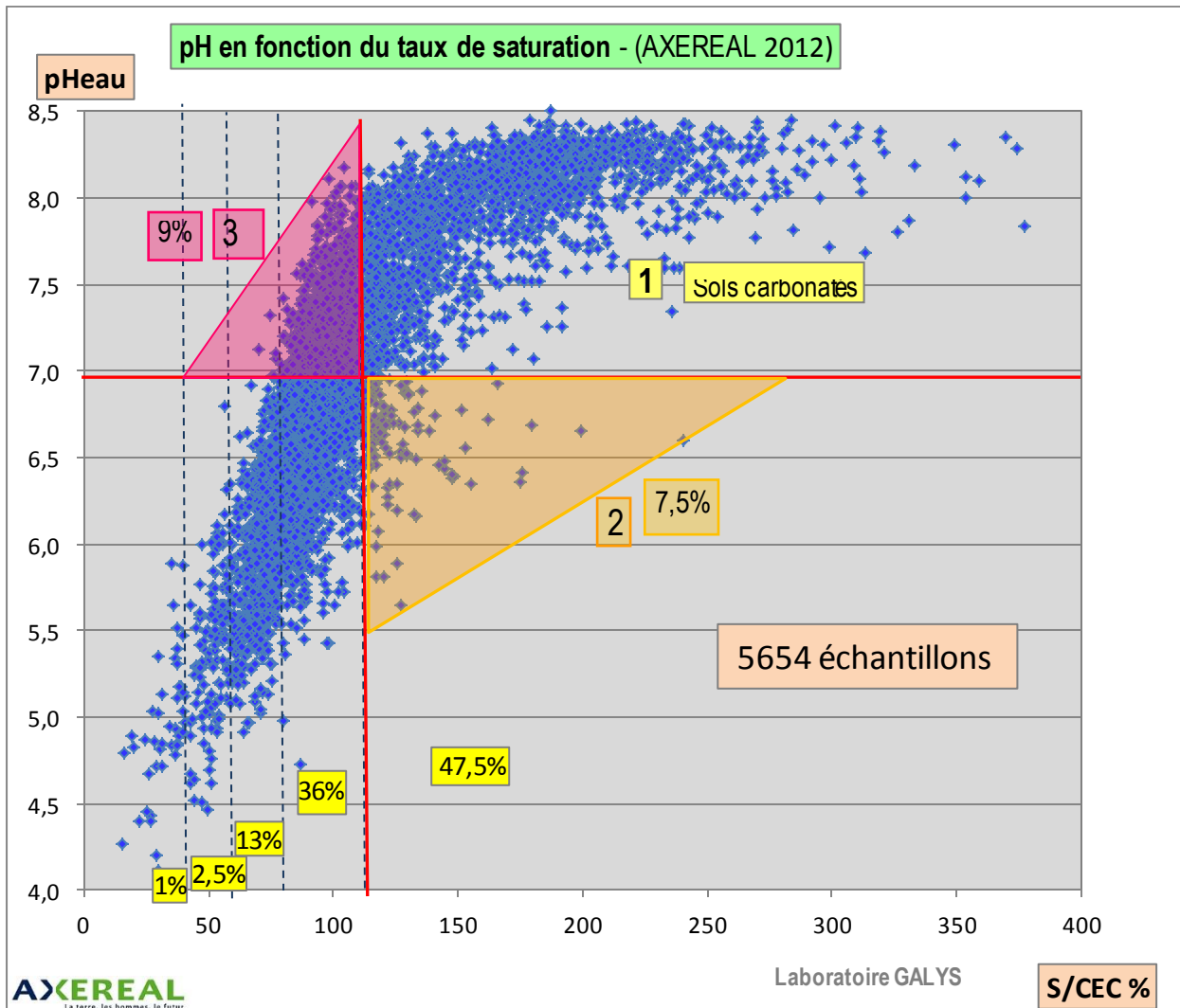


Figure 7 : Etude de la relation pH_{eau} – S/CEC coopérative AXEREAAL : Région Centre
Une proportion d'analyses présente une certaine discordance :

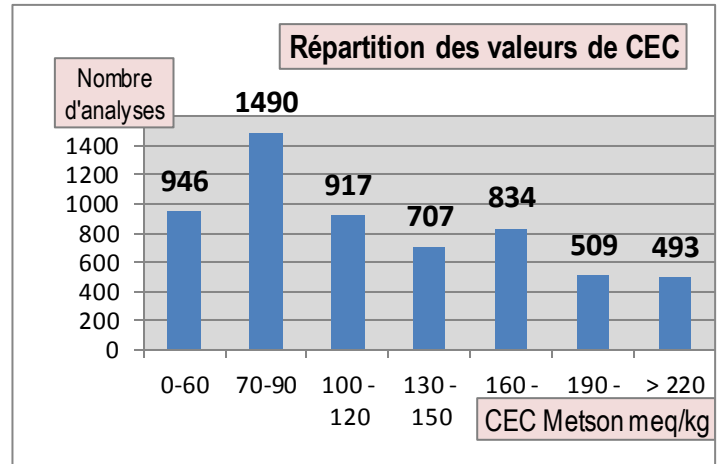
11^{èmes} rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse
COMIFER-GEMAS - Poitiers-Futuroscope 20 et 21 novembre 2013

- 2 - 7,5% avec $\text{pH}_{\text{eau}} < 7,0$ et $\text{S}/\text{CEC} > 100\%$.
- 3 - 9% des analyses avec $\text{pH}_{\text{eau}} > 7,0$ et $\text{S}/\text{CEC} < 100\%$

Sur l'ensemble des échantillons, 17% d'analyses présentent une CEC Metson < 70 meq/kg, CEC considérée comme faible.

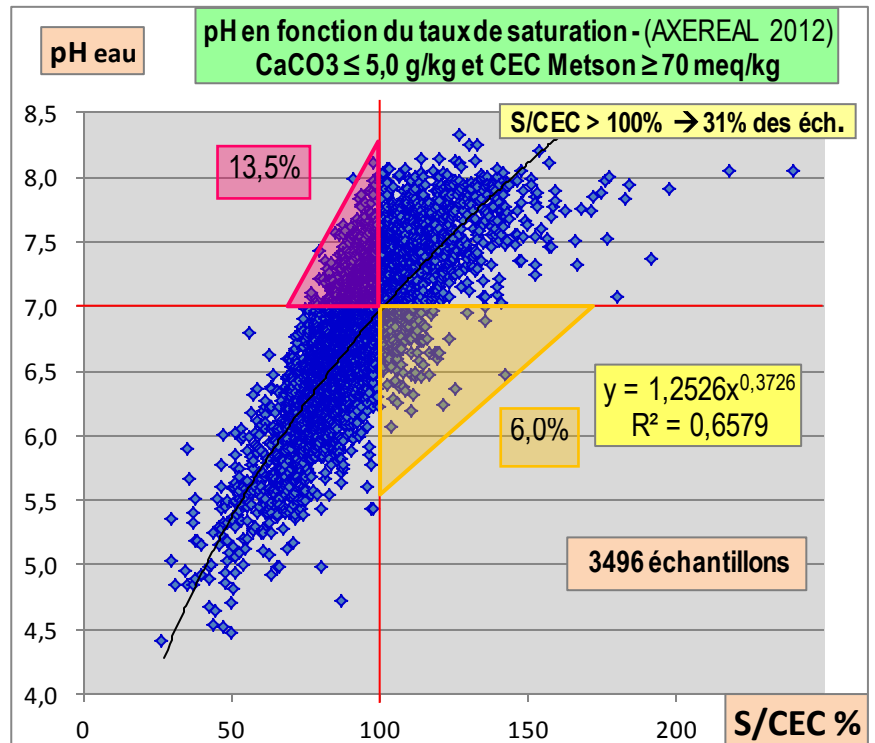
Pour cette proportion non négligeable d'analyses, l'indicateur S/CEC risque de présenter une précision médiocre (voir explication ultérieure)

Figure 8 :
Répartition des valeurs de la CEC Metson des analyses de sol de 2012, Coopérative AXEREAAL (Région Centre)



► Une 2^{nde} approche est réalisée en triant uniquement les analyses dont la teneur en calcaire total $\leq 5,0$ g/kg et la CEC Metson ≥ 70 meq/kg. (Voir figure 9).

Figure 9 :
Etude de la relation $\text{pH}_{\text{eau}} - \text{S}/\text{CEC}$ coopérative AXEREAAL Région Centre : analyses de sol réalisées en 2012 avec calc. tot. $\leq 5,0$ g/kg et CEC Metson ≥ 70 meq/kg



A partir de cette base de données, deux lots sont réalisés : les analyses prélevées en période hivernale (novembre, décembre, janvier, février, mars) et celles sur les saisons printemps, été et automne.

La figure 10 correspond aux analyses de sol prélevées sur la période hivernale. Le nuage de points pH_{eau} en fonction du taux de saturation fait apparaître une augmentation des discordances correspondant aux situations où $\text{S}/\text{CEC} < 100\%$ et $\text{pH} > 7,0$. De 13,5 % sur la globalité, cette proportion passe à 24 %. Les situations présentant une discordance inverse $\text{S}/\text{CEC} > 100\%$ et $\text{pH} < 7,0$ subissent l'inverse en passant de 6,0% sur la globalité à 1,5 %.

La figure 11 correspond aux analyses de sol prélevées sur les saisons de printemps, d'été et d'automne. Voir tableau 4 (comparatif des proportions de discordances).

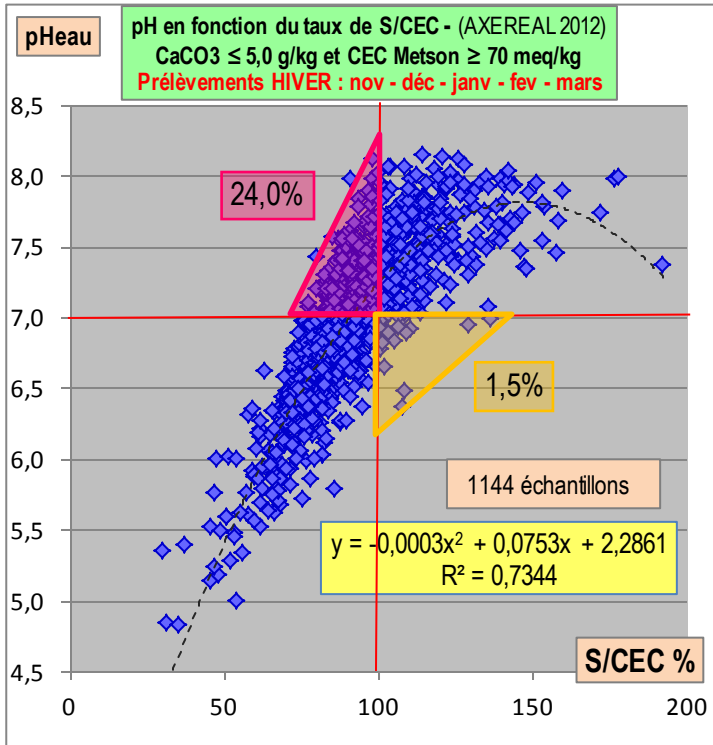


Figure 10 : Etude de la relation pHeau – S/CEC coopérative AXEREAAL prélèvements "HIVER"

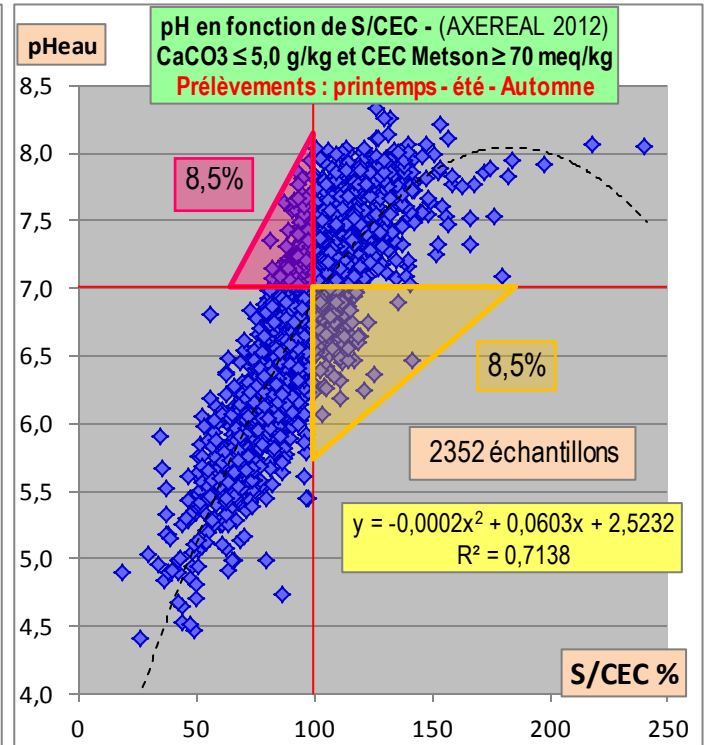


Figure 11 : Etude de la relation pHeau – S/CEC coopérative AXEREAAL prélèvements "ETE"

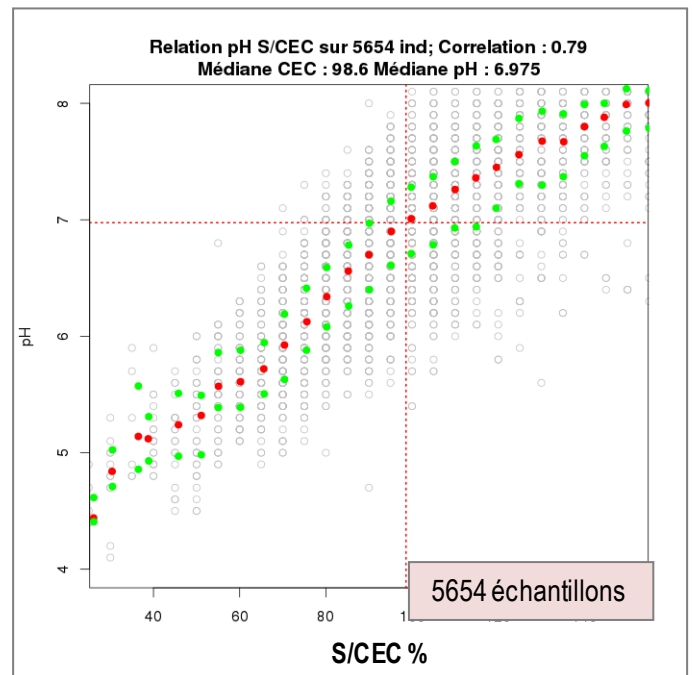
Cas de discordance en % du nombre d'analyses	Total AXEREAAL 2012	Tri : CEC >=70 meq/kg et CaCO3 total <= 5,0 g/kg	Tri prélèvements Hiver	Tri prélèvements Print-été-Automne
S/CEC > 100 et pH < 7,0	7,5	6,0	1,5	8,5
S/CEC < 100 et pH > 7,0	9,0	13,5	24,0	8,5
Total des cas de discordance	16,5	19,5	25,5	17,0

Tableau 4 : Comparaison des proportions de situations de discordance.

► Une 3^{ème} approche est réalisée. En effet, l'approche "nuage de points" a l'inconvénient de mettre en avant la dispersion, car l'empilement des points n'est pas perceptible. Cette nouvelle approche consiste à rechercher par "tranche" de CEC_{Metson}, les pHeau médians, ainsi que les 1^{ers} et 3^{èmes} quartiles (entre lesquels se trouvent 50% des analyses). La relation pHeau en fonction de S/CEC se dessine alors très clairement. (Voir figure 12).

Figure 12 : Etude de la relation pHeau – S/CEC Coopérative AXEREAAL analyses 2012

- Arrondis de chaque taux S/CEC à 5% près
- ● Points rouges = médiane des pH
- ● Points verts 1 = 1^{er} quartile = Q1
- ● Points verts 2 = 3^{ème} quartile = Q3
- 50 % des analyses entre Q1 et Q3



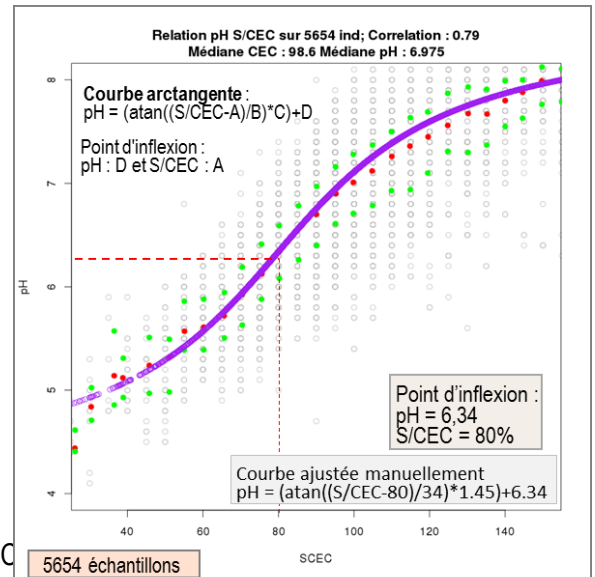
En lien avec la courbe en "S" que dessine celle "des Pouvoirs tampon des sols s'opposant à l'élévation ou la diminution de leur pH_{eau} " (voir figure 1), il est possible d'ajuster manuellement une courbe arctangente, (courbe mauve), qui en suivant les points des pH médians (●) s'inscrit entre les 1^{ers} et 3^{èmes} quartiles (●).

Aux extrémités de cette courbe, se visualisent les pouvoirs tampon :

- Carbonate (sols basiques)
- Aluminium (sols très acides).

(Voir figure 13)

Figure 13 : Etude de la relation pH_{eau} – S/CEC
Coopérative AXEREA analyses 2012
Visualisation de la courbe arctangente pH fonction S/CEC

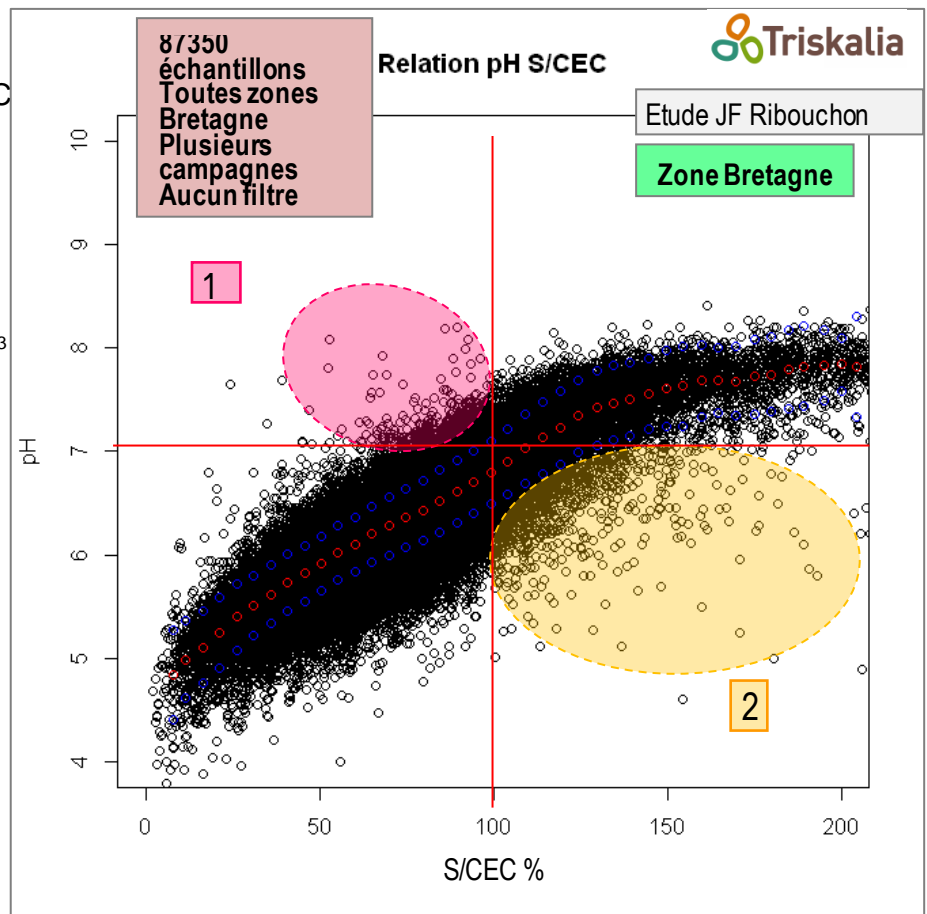


▪ Le même type d'étude a été réalisé sur la zone Bretagne à partir de 87 000 résultats d'analyses de terre réalisées sur plusieurs années (en provenance de la coopérative TRISKALIA). L'approche "nuage de points" met à aussi en avant la dispersion, alors que l'approche à partir des pH médians et des quartiles montre bien la relation pH_{eau} en fonction de S/CEC. (Voir figure 14).

Une approche plus fine par PRNA (Petites Régions Naturelles Agricoles) permet d'améliorer la relation pH_{eau} en fonction de S/CEC avec des coefficients de corrélation (R^2) de l'ordre de 0,80-0,85. (Voir figure 15)

Figure 14 :
Etude de la relation pH_{eau} - S/CEC
Coopérative TRISKALIA
Bretagne

- ● Point rouge médiane des pH
- ● Point bleu₁ = 1^{er} quartile = Q_1
- ● Point bleu₂ = 3^{ème} quartile = Q_3
- 50% des valeurs entre Q_1 et Q_3



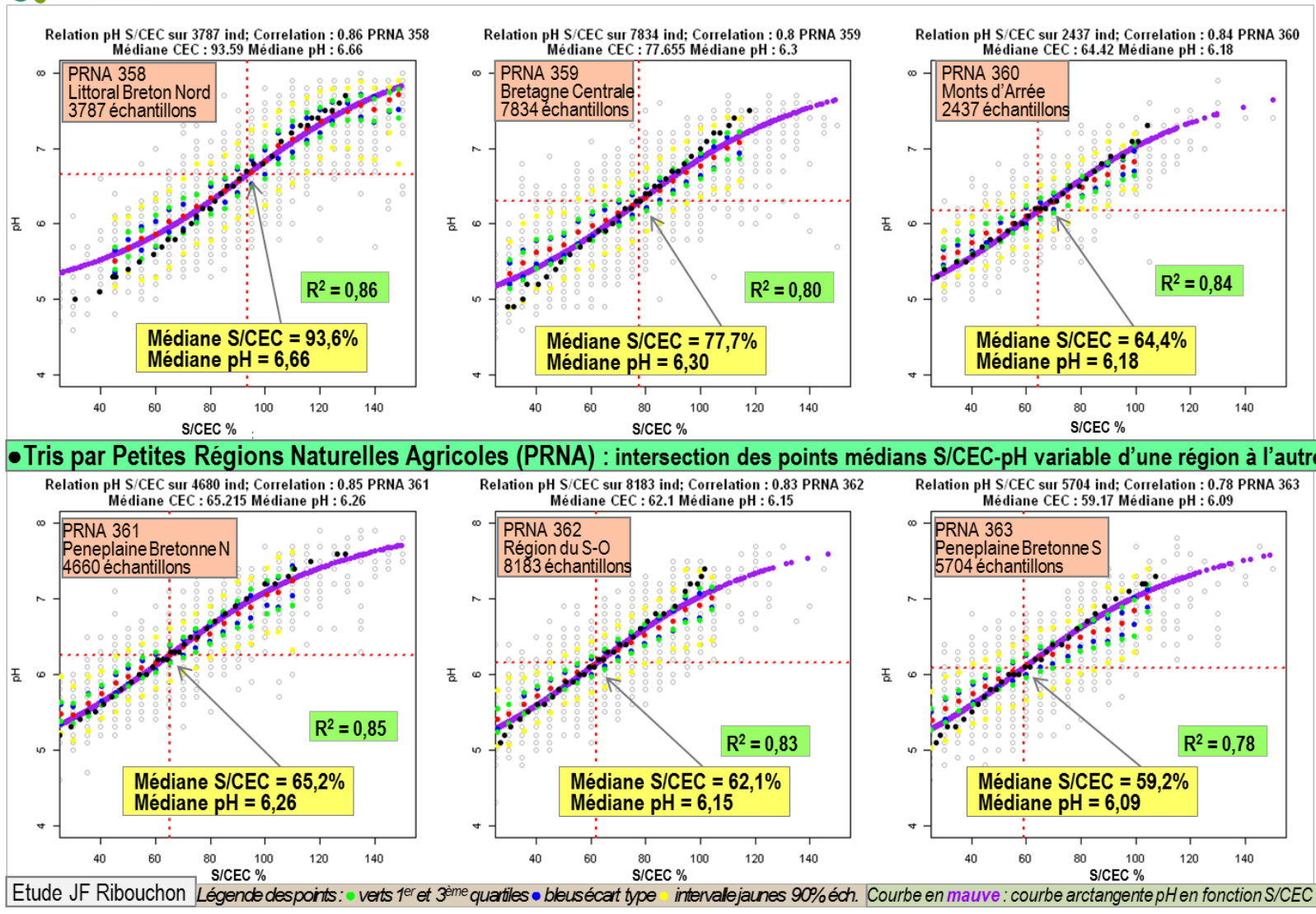


Figure 15 : Etude de la relation pH_{eau} - S/CEC, coopérative TRISKALIA Bretagne – approche par Petites Régions Naturelles Agricoles

II. Synthèse : pH_{eau}, S/CEC, Al. éch. 3 indicateurs pertinents de l'acidité

- **pH_{eau} :**

- Cet indicateur peut présenter une forte variabilité saisonnière.
 - Son interprétation doit nécessairement faire intervenir la date de prélèvement.
- Il est également conseillé dans les cas de suivi analytique de parcelles, de réaliser les prélèvements à peu près à la même période pour une comparaison dans le temps.
- Ce paramètre essentiel de l'analyse de terre est actuellement le mieux référencé et traduit de façon pertinente l'ambiance chimique du sol au moment du prélèvement.

- **S/CEC :**

- Cet indicateur est moins sujet aux variations saisonnières.
- Il est assez bien corrélé avec le pH_{eau}.
- Pour les faibles CEC méthode Metson (sol sableux – sablo-limoneux), cet indicateur présente une précision insuffisante pour être pertinent (voir paragraphe suivant).
- Certaines situations présentent des discordances entre l'indicateur pH et l'indicateur S/CEC (voir paragraphe suivant).

- **Aluminium échangeable**

- Cet indicateur apporte une information intéressante, dans les situations franchement acides (pH eau < 5,8).
- Il traduit le risque réel d'accident dû à une acidité importante.
- Dans les sols à forte teneur en matière organique (MO), son interprétation est rendue plus délicate, en lien avec la difficulté à connaître la réelle proportion d'Al. éch. qui serait séquestrée par la MO.

III. Cas de discordance entre indicateurs de l'acidité :

Dans cette partie, sont étudiées les diverses causes possibles pouvant expliquer les situations de discordance entre les indicateurs pH_{eau} et taux de saturation (S/CEC).

a) Variation saisonnière du pH_{eau}.

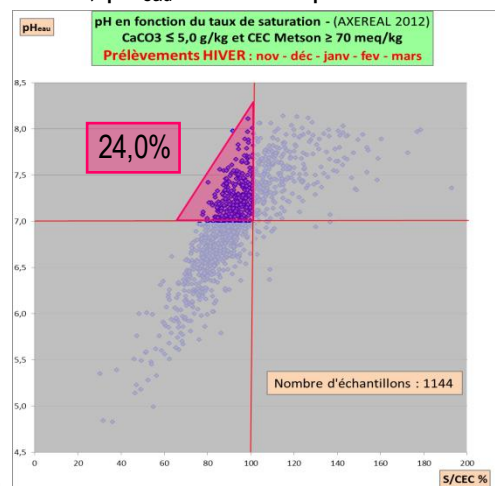
La remontée plus ou moins importante du pH durant les mois d'hiver peut expliquer la proportion plus importante de discordance entre les deux indicateurs, pH_{eau} et S/CEC pour des prélèvements hivernaux.

L'abaissement de la température entraîne une activité réduite des micro-organismes et des racines :

- La concentration en acide carbonique H₂CO₃ qui diminue, a pour conséquence la remontée de l'indicateur pH_{eau}.
- Parallèlement, la teneur en CaO échangeable subit peu de variation.
- Ce phénomène peut être une des causes de la discordance entre les indicateurs pH_{eau} et S/CEC, apportant une explication aux situations avec pH_{eau} > 7,0 et S/CEC < 100%. (Voir figure 16)

Figure 16 : Etude de la relation pH_{eau} – S/CEC
Coopérative AXEREAAL analyses 2012, prélèvements HIVER

11^{èmes} rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse
COMIFER-GEMAS - Poitiers-Futuroscope 20 et 21 novembre 2013



b) La présence de carbonates résiduels :

Dans certaines situations, en lien avec l'historique des apports de CaCO_3 , la présence de carbonates résiduels (non dosés par la méthode classique du calcaire total) va entraîner une surestimation de la teneur en CaO échangeable et par là même de S/CEC.

L'extractif utilisé pour doser le calcium échangeable va dans ce cas dissoudre en surface les particules de carbonates résiduels et ainsi contribuer à surestimer la teneur en calcium échangeable et donc le taux de saturation.

Ces carbonates résiduels peuvent être dus à des apports d'amendements minéraux basiques anciens, avec présence de particules plus ou moins grossières qui peuvent rester encore non totalement dissoutes au bout de 3 – 4 ans (voire plus) (Expérimentation Arvalis Alain Bouthier).

Certains amendements organiques peuvent être pourvoyeurs de particules de carbonates plus ou moins grossières. C'est le cas notamment des apports de fientes de poules pondeuses. En cas d'apport récent, il faudra en tenir compte dans la validation de la pertinence de l'indicateur S/CEC.

c) La précision des mesures et notamment de l'indicateur S/CEC :

Comme vu précédemment, l'indicateur S/CEC émane d'un calcul établi à partir de plusieurs paramètres analytiques.

Plusieurs approches sont possibles pour cerner l'incertitude de S/CEC.

- Une 1^{ère} approche consiste à déterminer l'incertitude globale en additionnant l'incertitude de chaque paramètre.

Incertitude globale = $\sqrt{\sum (\text{incertitudes individuelles}^2)}$

Cette approche donne une incertitude élevée de cet indicateur, trop élevée pour correspondre à une réalité concrète.

- Une autre approche est possible en utilisant les "terres témoin" des laboratoires. L'ensemble des paramètres de l'échantillon témoin est dosé de multiple fois (plusieurs centaines). Ainsi pour chaque passage de la "terre témoin" dans la chaîne laboratoire, un calcul de S/CEC est effectué. L'obtention d'une série de valeurs pour cet indicateur permet une approche statistique (moyenne et écart-type).

- Cette approche met en évidence que plus la CEC Metson d'un sol est faible, plus l'incertitude de l'indicateur S/CEC est élevée. Le *tableau 5* compare deux analyses dont l'indicateur S/CEC indique 80%. Une analyse correspond à un sol sablo-limoneux avec une CEC Metson faible (50 meq/kg) et l'autre à un sol argileux avec une CEC Metson plutôt élevée (200 meq/kg). L'incertitude de l'indicateur S/CEC diffère grandement entre les deux. L'écart-type exprimé en % de la moyenne correspond à 13% pour le sable-limoneux et 4,5% pour l'argile.

TEXTURE	Sablo-limoneuse	Argileuse
Référence parcelle	Exemple 1: 2012072737 parcelle COUDRAY	Exemple 2 : 2012070268 parcelle PIECE DE LA VIGNE
C.P commune	45250 OUZOUEUR SUR TREZEE	36220 TOURNON ST MARTIN
Paramètre (unité)	CEC FAIBLE	CEC ELEVEE
CaO(mg/kg)	1002	3873
K2O (mg/kg)	80	247
MgO (mg/kg)	52	332
Na2O (mg/kg)		
CEC (meq/kg)	50	200
pHeau	5,8	6,3
S/CEC (%)	80,1	80,0
Incertitude S/CEC écart-type / moyenne (%)	13,0	4,5

Tableau 5 : comparaison de l'incertitude de S/CEC entre 2 analyses

• Pour une meilleure compréhension, une courbe théorique de l'incertitude de l'indicateur S/CEC en fonction de la CEC se trouve en *figure 17*, mettant en évidence que dans les sols à faible CEC (sol sableux ou sablo-limoneux) l'indicateur S/CEC est de précision insuffisante pour être pertinent. Dans les sols à CEC Metson ≤ 60 meq/kg, il est préférable de raisonner le chaulage à partir de l'indicateur pH_{eau} . C'est d'ailleurs les préconisations de la brochure « Le chaulage des bases pour le raisonner » où en sol sableux les formules de calcul d'apport se basent sur le seul paramètre pH_{eau} .

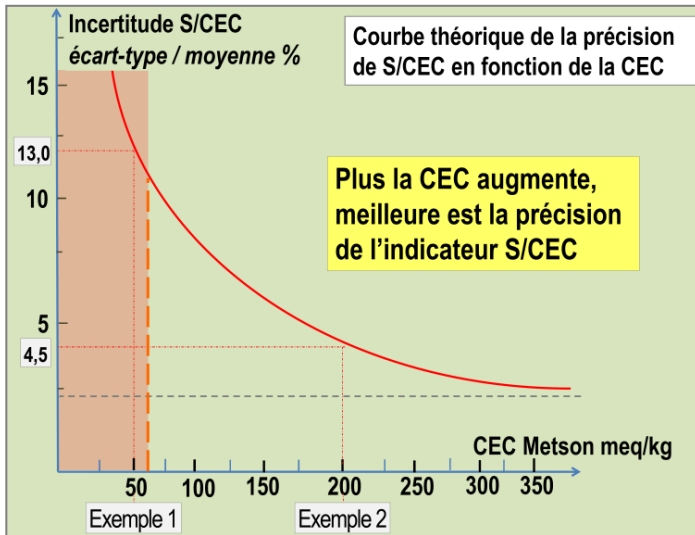


Figure 17 : Courbe théorique de la précision de l'indicateur S/CEC en fonction de la CEC

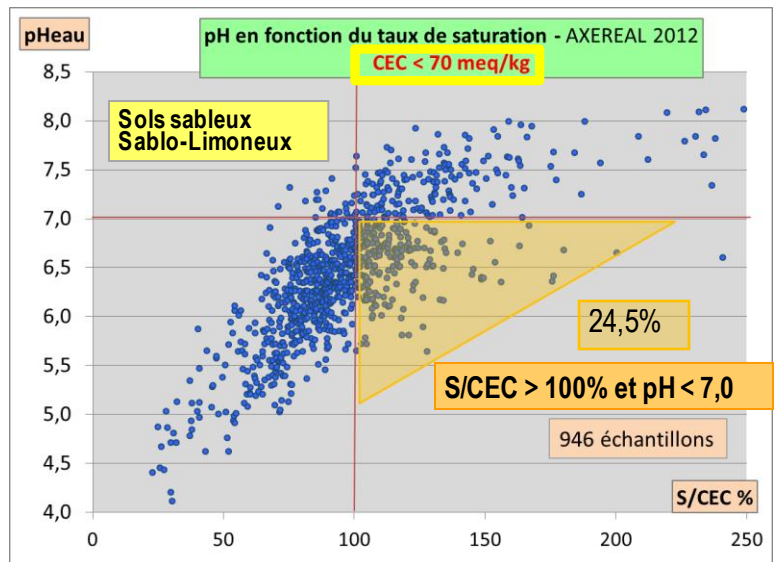


Figure 18 : Etude de la relation pH_{eau} S/CEC AXERREAL analyses 2012 : CEC < 70 meq/kg

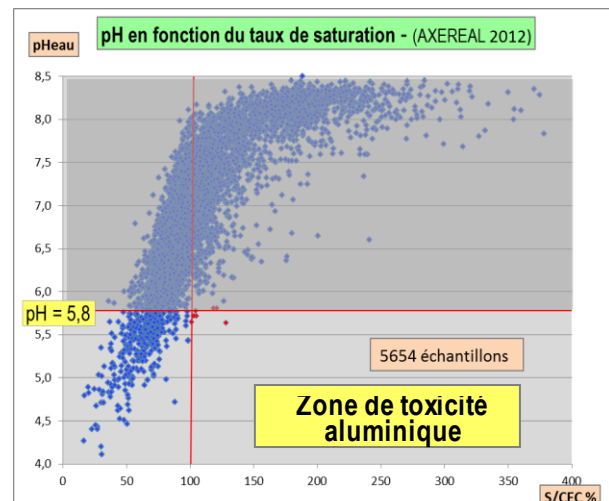
• En triant sur l'ensemble des analyses AXERREAL 2012, celles dont la CEC Metson < 70 meq/kg et en étudiant la relation pH_{eau} en fonction de S/CEC, il apparaît que la proportion d'analyses avec discordance S/CEC > 100% et $\text{pH}_{\text{eau}} < 7,0$ augmente très largement. De 7,5% sur la globalité, cette proportion passe à 24,5%, mettant en évidence qu'en sol à faible CEC, les risques de surestimer ou de sous-estimer S/CEC sont élevés. Voir *figure 18*.

IV. Conclusions : Quels sont les éléments à prendre en compte pour raisonner le chaulage, notamment dans des situations où les indicateurs de l'acidité présentent une discordance ?

a) En sol très acide : ($\text{pH} < 5,8$: zone de risque de toxicité aluminique)

Dans ces situations, les indicateurs pH_{eau} et S/CEC vont toujours dans le même sens et ils ne présentent pas de discordance (ou très rarement). Voir *figure 19*

Figure 19 : Etude de la relation pH_{eau} - S/CEC : AXERREAL analyses 2012 pour les $\text{pH}_{\text{eau}} < 5,8$



b) Indicateurs pH_{eau} et Taux de Saturation (S/CEC)

Ces deux indicateurs sont relativement bien corrélés.

Cependant, dans certaines situations, ils peuvent être discordants :

- Echantillons prélevés l'hiver : discordances plus fréquentes, il est nécessaire d'intégrer la date de prélèvement pour le conseil chaulage.
- Présence de particules de carbonates résiduels qui peut entraîner une surestimation du Calcium échangeable et donc de S/CEC. Intégrer l'historique des apports d'amendements minéraux calciques basiques dans le conseil chaulage.

c) Précision de l'indicateur S/CEC :

L'indicateur Taux de Saturation (S/CEC) se révèle de précision médiocre pour les sols à faible CEC (Sable / sable limoneux). Dans ces situations, raisonner le chaulage à partir de l'indicateur pH_{eau} .

d) L'indicateur aluminium échangeable :

En sol très acide ($pH_{eau} < 5,5$) la teneur en Al. éch. permet d'ajuster le conseil de la dose d'apport.

e) Dans le cas de discordance entre l'indicateur pH_{eau} et S/CEC :

S'il y a une discordance entre les indicateurs pH_{eau} et S/CEC, le conseil sera basé sur une politique intermédiaire.

La pratique de l'amendement sera un compromis entre :

- Le coût économique (risque d'en apporter trop).
- Le risque d'inefficacité (risque de ne pas en apporter assez).

Références bibliographiques :

- AFNOR, mai 2005, NF ISO 10390 : Qualité du sol – détermination du pH
- BOUTHIER A. et SOENEN B., 2013, Perspectives Agricoles 398 : Acidification - La gestion de l'azote et le choix des cultures ont un impact important.
- CASTILLON P. et BOUTHIER A., 2011, Perspectives Agricoles 374 : Gérer le chaulage.
- COMIFER Groupe Chaulage, 2009 : Le chaulage - Des bases pour le raisonner.
- GAUMONT F-X. et BOUTHIER A., 2013 : Utilisation de la méthode d'analyse des carbonates résiduels pour étudier le devenir au champ des amendements minéraux basiques carbonatés.
- KOCKMANN F., FABRE B. et CHAUSSOD R., 1990, Perspectives Agricoles 144 : Le chaulage en limons battants.
- TURPIN A., 2007 : L'adsorption des ions dans le sol (ENFA)