

comifer



11^{èmes}

RENCONTRES

de la fertilisation raisonnée et de l'analyse



11^{èmes} Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse – 20 et 21 novembre 2013

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

- Bruno Félix-Faure (GALYS)
 - Sébastien Kalt (LCA)
- Matthias Carrière (SAS-Agrosystème)



Sommaire

- Les indicateurs de l'acidité :
 - pH_{eau} - pH_{KCl} -
 - Aluminium Échangeable
 - Taux de saturation (S/CEC)
- Les indicateurs les plus pertinents pour un conseil chaulage
- Cas de discordance entre indicateurs de l'acidité :
 - Les causes possibles :
 - Variations saisonnières du pH
 - La présence de carbonates résiduels
 - La précision des mesures
 - Conclusions : quelles décisions pour un conseil ?
 - Prise en compte de
 - La date du prélèvement
 - L'historique des apports



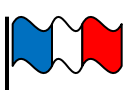
Les indicateurs de l'acidité :

→ Le pH_{eau} : $pH_{\text{eau}} = \text{Log } 1/ [H^+]$

Cologarithme décimal de la concentration molaire (exprimée en moles par litre) en ions hydrogène

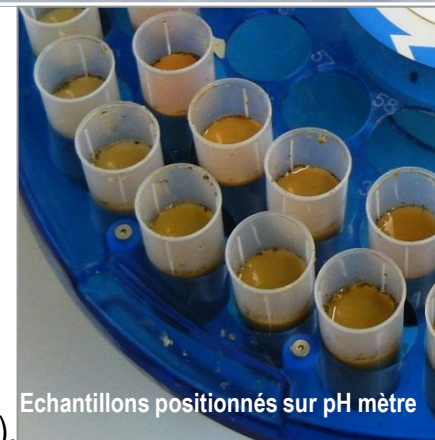
Mesure laboratoire : 1 volume de sol dans 5 fois son volume d'eau

- Sol = terre fine (<2mm) et sèche
- Agitation 1 h et attendre 1 h avant mesure au pH mètre (à 20 °C)



En France nous utilisons principalement le pH_{eau} .

Dans les pays anglo-saxons il est utilisé pH_{CaCl_2} - solution de CaCl_2 ($c = 0.01 \text{ mol L}^{-1}$).



Echantillons positionnés sur pH mètre

Signification de cette mesure :

- Dans le sol les flux de protons sont permanents
- La mesure du pH_{eau} en est 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
- l'activité racinaire

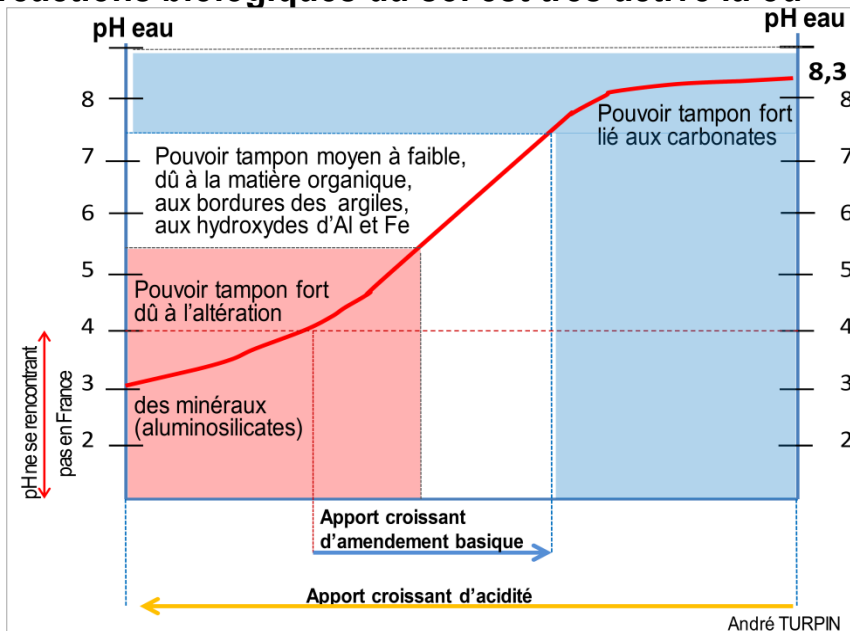
Le sol va s'opposer à la variation du pH, grâce à son pouvoir tampon :

- Elévation de pH dans le cas de chaulage
- Diminution de pH lors de phénomènes d'acidification

-L'argile et la matière organique, par leur pouvoir tampon s'opposent aux variations de pH.

-Dans les sols acides intervient le pouvoir tampon lié à l'altération des minéraux aluminosilicates (Al. éch.)

-Dans les sols carbonatés (sols calcaires) intervient le fort pouvoir tampon lié à la présence de CaCO_3 .



André TURPIN

→ Le pH_{eau}

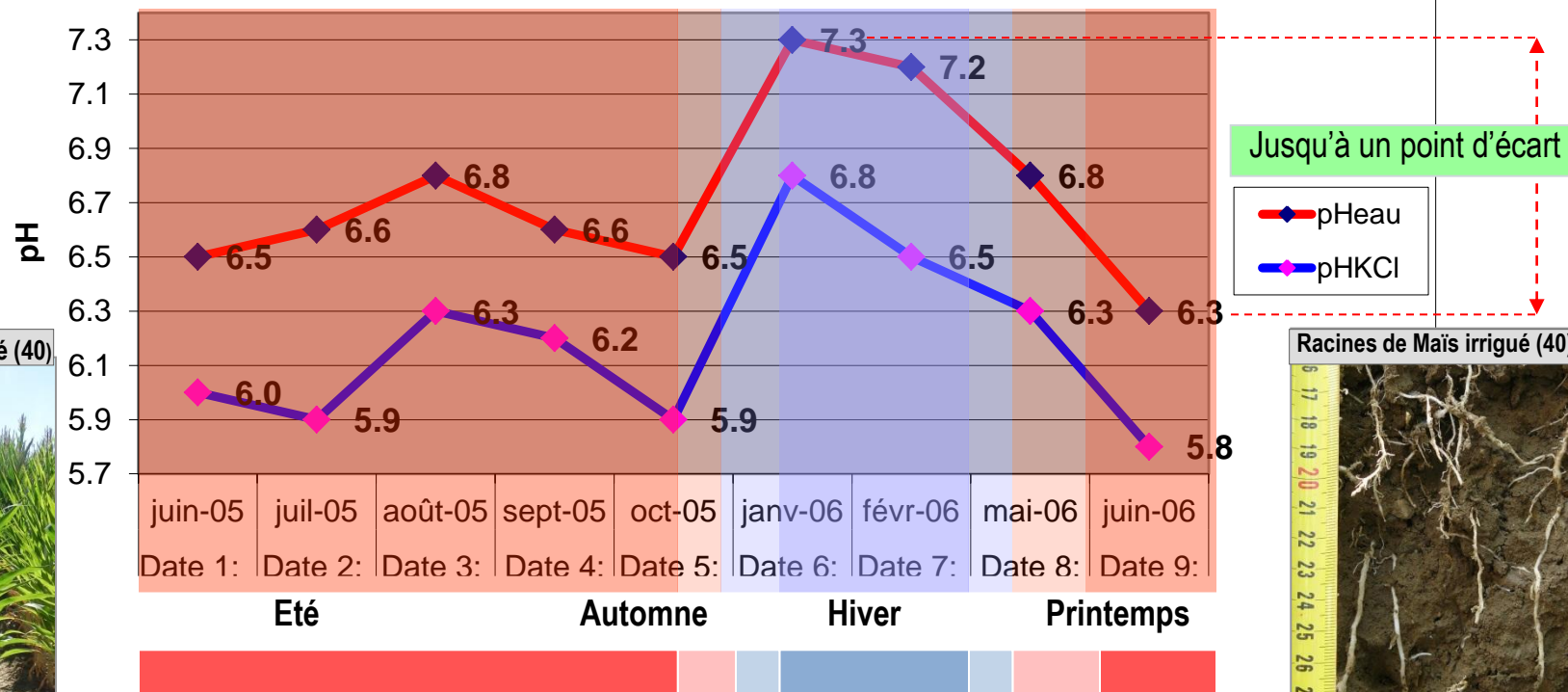
Variations saisonnières de l'indicateur pH_{eau}

Les périodes favorables à l'activité biologique correspondent à une acidification du sol

Exemple d'un suivi du pH_{eau} et pH_{KCl} sur une parcelle (9 dates de prélèvements)
Monoculture Maïs grain **irrigué**, commune de St SEVER 40500

Variations saisonnières du pHeau et du pHKCl Maisadour 2005-2006 (sol de Limon)

Sol de Limon : argile = 12,5% - Matières organiques = 1,3% - CECMetson = 72 meq/kg



Maïs irrigué (40)



Racines de Maïs irrigué (40)



→ Le pH_{eau}

Variations saisonnières de l'indicateur pH

Explications :

Printemps, été et automne :

- Respiration des microorganismes et des racines (CO₂)
- Augmentation de la concentration en acide carbonique (2 HCO₃⁻ + 2 H⁺) de la solution du sol
- Conséquence : diminution du pH.
- Cette acidification n'est pas durable :

- progressivement l'acide carbonique se rééquilibre avec l'atmosphère

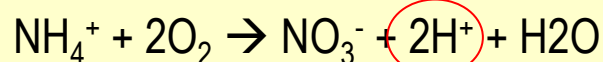


- le pH remonte par la suite

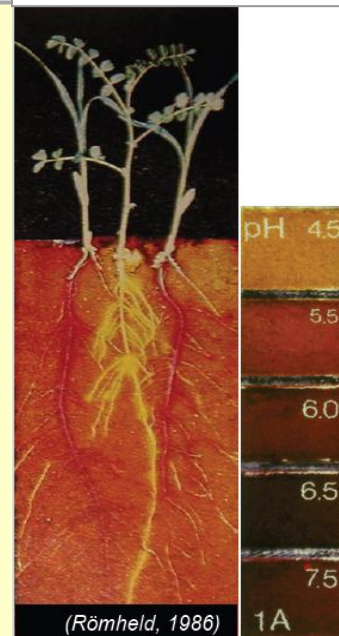
- cette remontée peut être partielle s'il y a lixiviation des ions hydrogénocarbonates (HCO₃⁻)

Sur culture de Maïs, la majeure partie de l'apport azoté se réalise sur mai ou juin.

- La nitrification de cet azote entraîne durant cette phase une acidification :



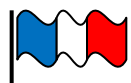
Acidification de la rhizosphère



Les indicateurs de l'acidité :

→ Le pH_{KCl} :

Mesure laboratoire : 1 volume de sol dans 5 fois son volume d'une solution de chlorure de potassium (KCl) à 1 mol/l.



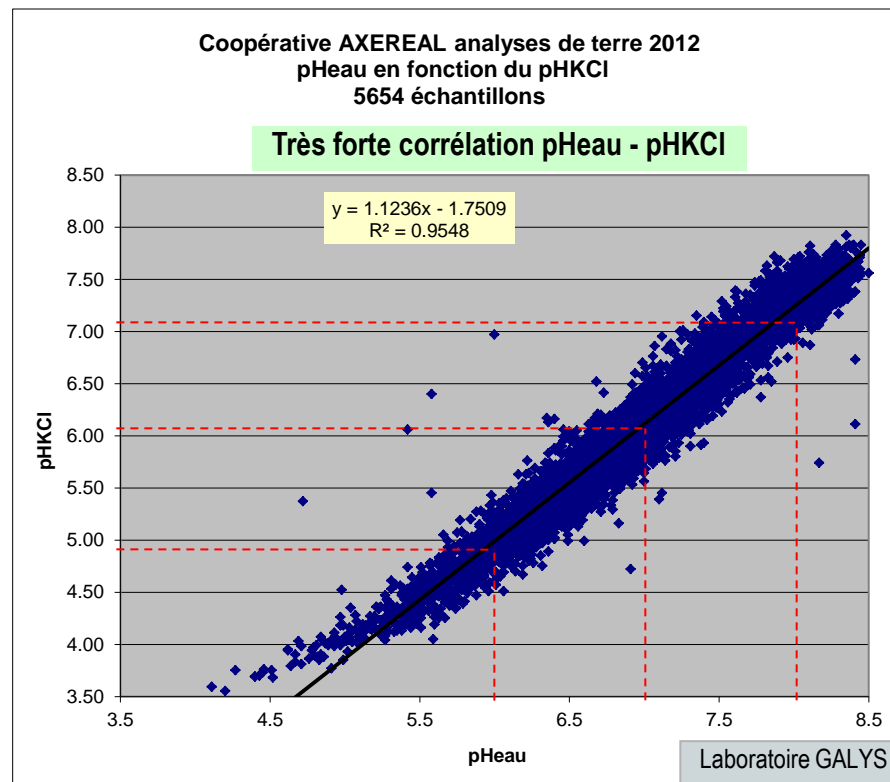
Les sols français présentent un pH_{KCl} toujours inférieur au pH_{eau} .

- 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

- Le pH_{KCl} a une variation saisonnière similaire à celle du pH_{eau} .

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

- Nuage de points à partir d'éch. réalisés sur 2012, région Centre (41, 45, 36, 18).
- Ecart $\text{pH}_{\text{eau}} - \text{pH}_{\text{KCl}}$ de l'ordre de 1,0 point.
- En sol calcaire, l'écart entre les 2 pH tend à se resserrer.
- Les sols très acides correspondent en majorité à des sols sableux (Sologne).



• Les indicateurs de l'acidité :

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

- Peu pratiqué en routine par les laboratoires
- Méthode analytique : Extractif solution de KCl, puis titration ou spectromètre.
- Lorsque le pHeau 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)

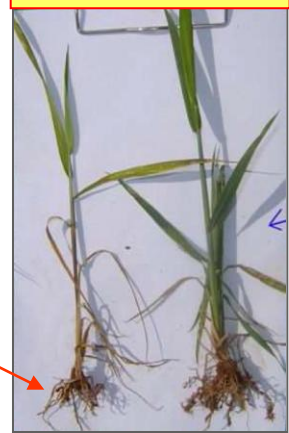
→ Libération dans la solution d'ions d'Aluminium : $Al(OH)_2^+ + H^+ \rightarrow Al^{3+} + H_2O$

→ Les ions Al^{3+} , plus facilement échangeables, peuvent prendre les places occupées par les cations Ca^{2+} , K^+ , et Mg^{2+} sur le système adsorbant.

→ Au-dessus de 50 mg/kg d'Al. échangeable : risque de toxicité

Toxicité aluminique - blé dur (81)

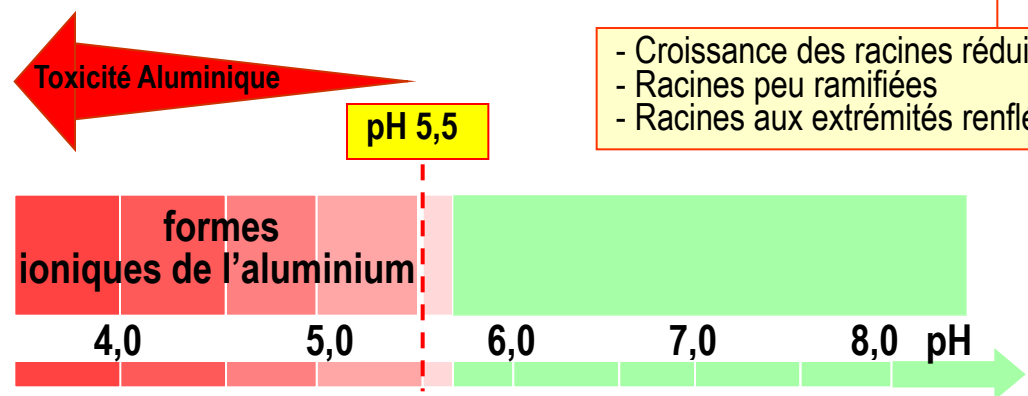
pH=4,7
Al.ech.=74,4mg/kg



pH=5,9
Al.ech.=6,5mg/kg



- Croissance des racines réduite
- Racines peu ramifiées
- Racines aux extrémités renflées



→ L'Aluminium échangeable

Exemple de toxicité aluminique

Parcelle située à proximité d'Albi (81)

Culture Blé dur – problème de zones avec dépérissement puis disparition de la majorité des plantes

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

zone 1 : Rien ne pousse

– zone 2 : Blé + folle avoine

– zone 3 : bon blé dur

Dépérissement, disparition du blé

Zone 1



Pieds de blé et racines

Ref	Sable Grossier g/kg	Sable Fin g/kg	Limon Grossier g/kg	Limon Fin g/kg	Argile g/kg	Matières Organiques g/kg	CEC meq/kg
Rien ne pousse	247	243	130	149	211	20,8	97

Al éch. = 74,5 mg/kg

Seuil toxicité aluminique : 50 mg/kg

pH_{eau} = 4,7

CaO échangeable = 480 mg/kg

pH_{KCl} = 4,3

Taux de saturation (S/CEC) = 20%

Teneur Al éch. > seuil toxicité

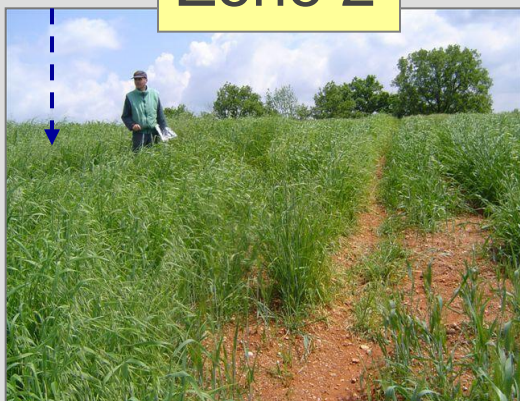
→ L'Aluminium Echangeable (Al. éch.) :

Exemple de toxicité aluminique

Folle avoine, le blé a disparu



Zone 2



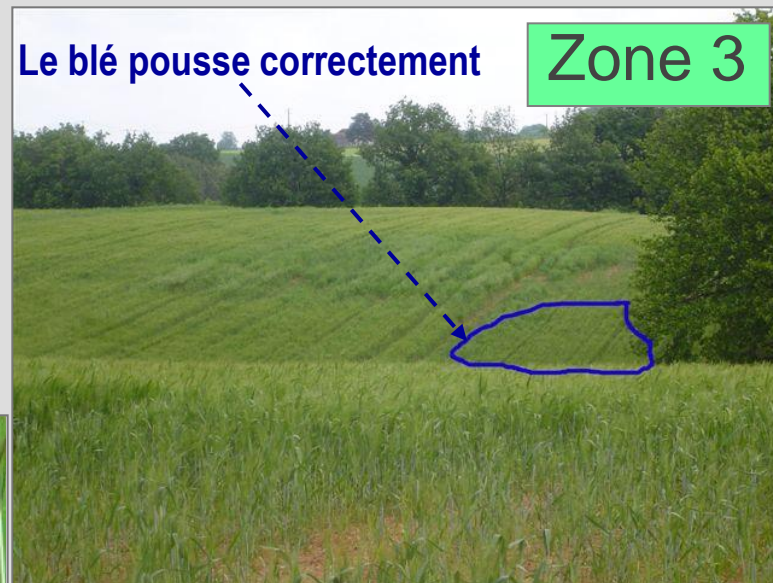
Pieds de blé et racines



Très forte corrélation entre la teneur en Al. éch. et le pH_{eau}

Le blé pousse correctement

Zone 3



Ref	Sable Grossier g/kg	Sable Fin g/kg	Limon Grossier g/kg	Limon Fin g/kg	Argile g/kg	Matières Organiques g/kg	CEC meq/kg
Blé + folle avoine	293	160	109	118	297	17,6	155

$pH_{eau} = 5,4$ $pH_{KCl} = 4,4$
 CaO échangeable = 1558 mg/kg
 Taux de saturation (S/CEC) = 40%

Al éch. = 40,2 mg/kg

Seuil toxicité aluminique : 50 mg/kg

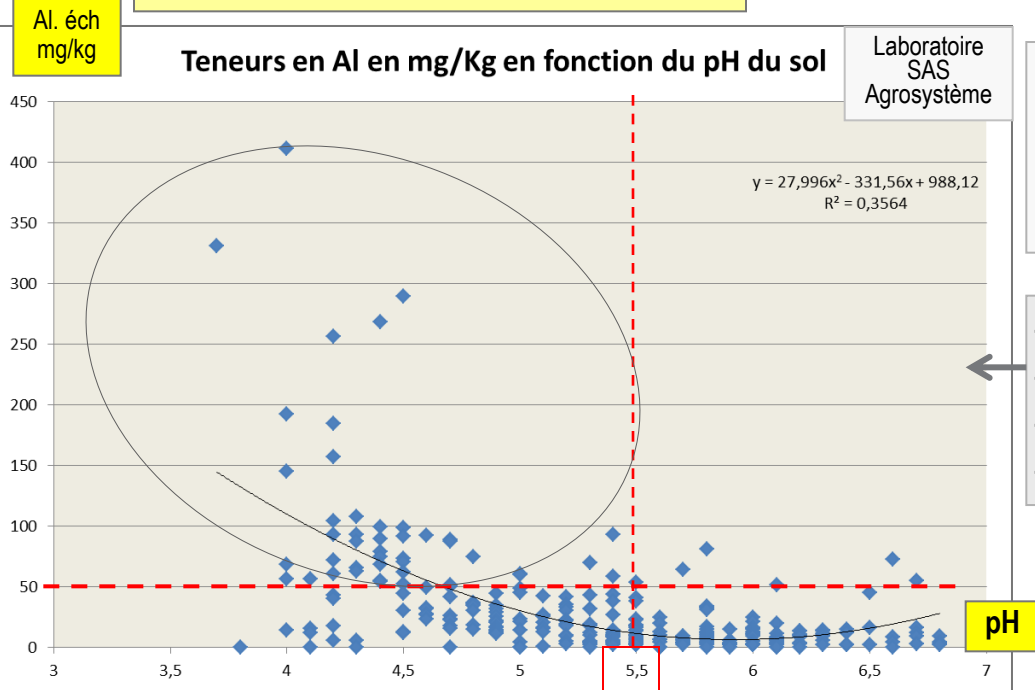
Ref	Sable Grossier g/kg	Sable Fin g/kg	Limon Grossier g/kg	Limon Fin g/kg	Argile g/kg	Matières Organiques g/kg	CEC meq/kg
Bon blé dur	331	221	128	133	178	19,2	92

$pH_{eau} = 5,9$ $pH_{KCl} = 5,1$
 CaO échangeable = 1257 mg/kg
 Taux de saturation (S/CEC) = 60%

Al éch. = 6,5 mg/kg

→ L'Aluminium Echangeable (Al. éch.) :

Echantillons de sols de la Loire (42),



- L'aluminium extrait par le KCl correspond dans sa majorité à la forme toxique

- Dans les sols à forte teneur en MO, de l'aluminium complexé (non toxique) est dosé

- 52 éch avec Al. éch > 50 mg sur 302 analyses

- Parcelles avec de fortes teneurs en MO

- 94 % avec teneur en MO > 3 %

- 48 % avec teneur en MO > 5 %

Dans des situations de sols très acides, le calcul du Besoin En Base (BEB) se devrait d'intégrer à la fois :

1 - Le BEB pour neutraliser l'Aluminium éch :

Apport d'amendement basique pour éliminer la toxicité de Al^{3+} échangeable

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

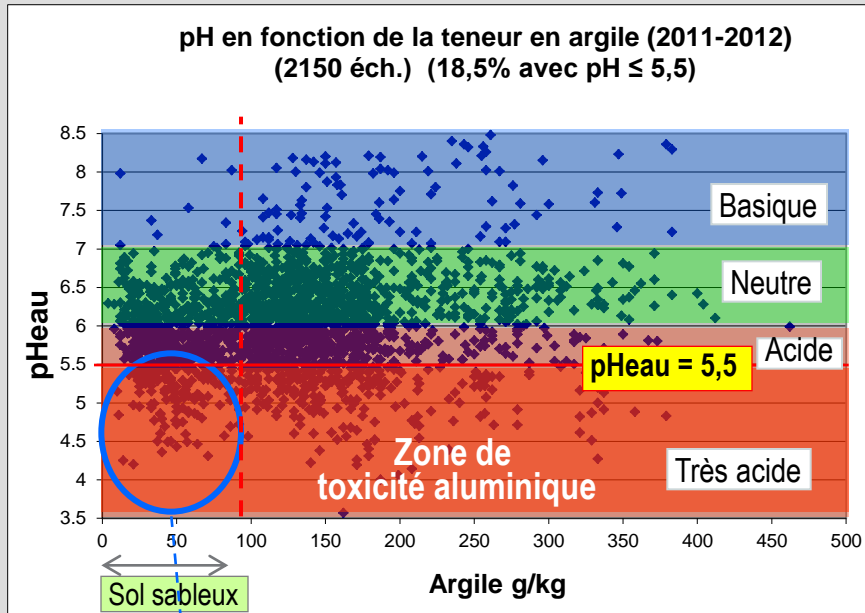
$BEB = (teneur\ Al) \times 3,11 \times 10^{-3} \times (Poids\ de\ Terre\ fine\ en\ T/ha)$

Soit pour 3000 T de Terre/ha et une teneur de 100 mg/kg : 930 unités VN/ha

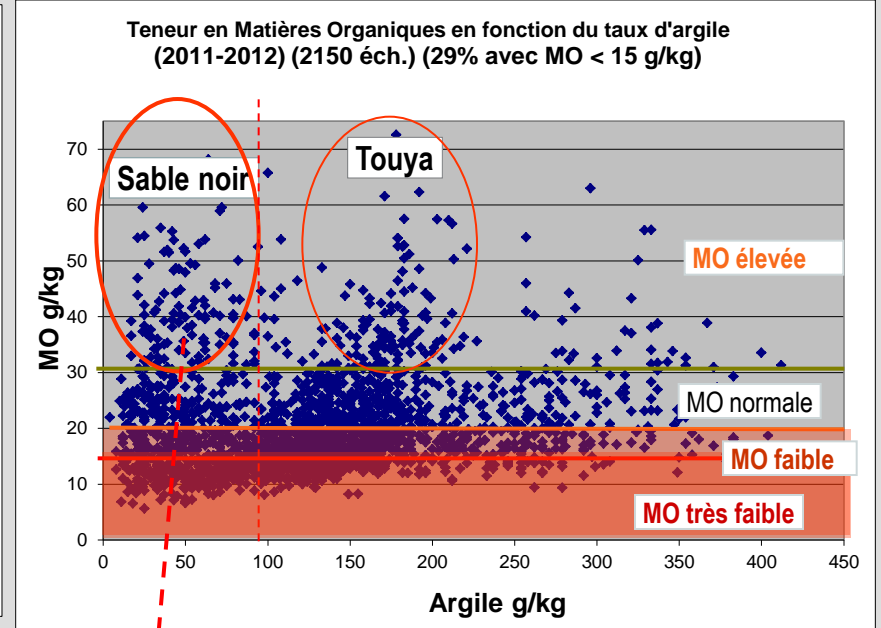
2 - Le BEB pour remonter le pH ou le taux de saturation (selon la méthode)

→ L'Aluminium Echangeable (Al. éch.) :

- Dans le diagnostic du risque de toxicité aluminique, prise en compte du **type de sol** et du **taux de matière organique** :



pH_{eau} : zone Maïsadour 2011-2012



**Teneurs en Matière Organique :
Maïsadour (33 – 40 – 64) 2011-2012**



Sable noir (Rions des Landes 40)

- Risque de toxicité aluminique nettement moins marqué en sable (très peu d'argile ou phyllosilicates d'aluminium).
- Ce risque l'est encore moins en sable noir, à forte teneur en matière organique (l'aluminium se séquestre avec la MO et sous cette forme n'est pas toxique).

- Les indicateurs de l'acidité :

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

- Indicateur analytique couramment calculé par les laboratoires

- Nécessite :

Le dosage des cations échangeables (Calcium, Magnésium, Potassium, Sodium*)

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

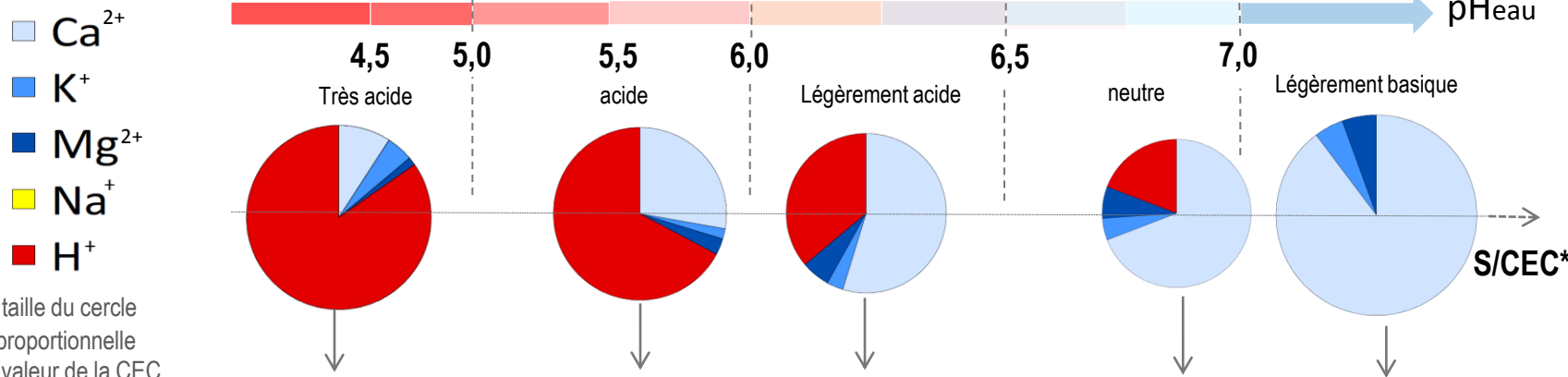
La mesure de la CEC méthode Metson (réalisée à pH 7,0 et non au pH du sol)

Exemple concret de calcul du taux de saturation

CALCUL S/CEC%		Parcelle : « Prat Vemec » – GAEC de Kermaria – 29140 TOURC'H				
Paramètres analytiques	pHeau	CECMetson 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	0,0322
Cation exprimé 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			

→ Le taux de saturation :

- La relation entre pH_{eau} et S/CEC



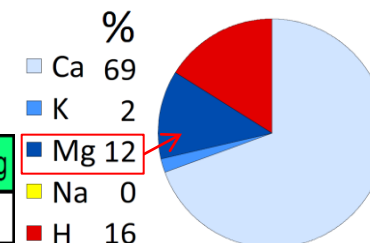
* La taille du cercle est proportionnelle à la valeur de la CEC

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

5 analyses de sol en provenance des départements 29 et 56

- Dans certains sols particuliers à teneur élevée en MgO, une partie parfois importante de la saturation de la CEC est réalisée par le Magnésium.

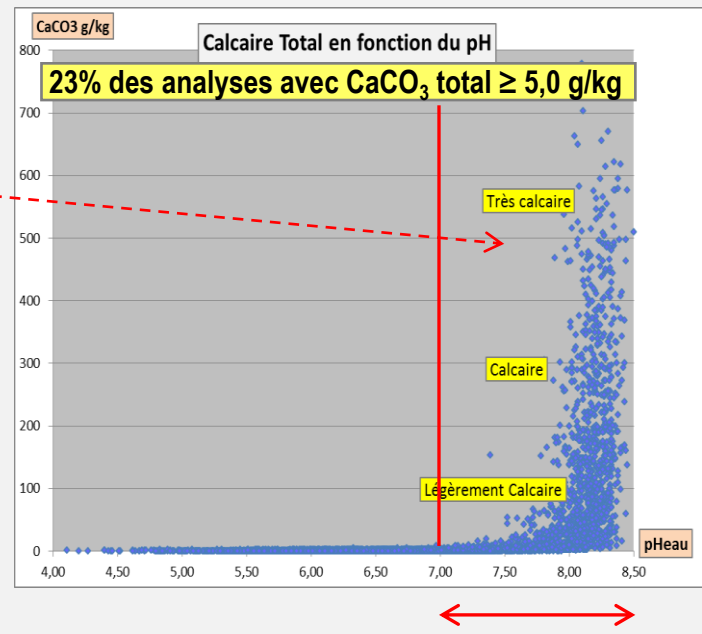
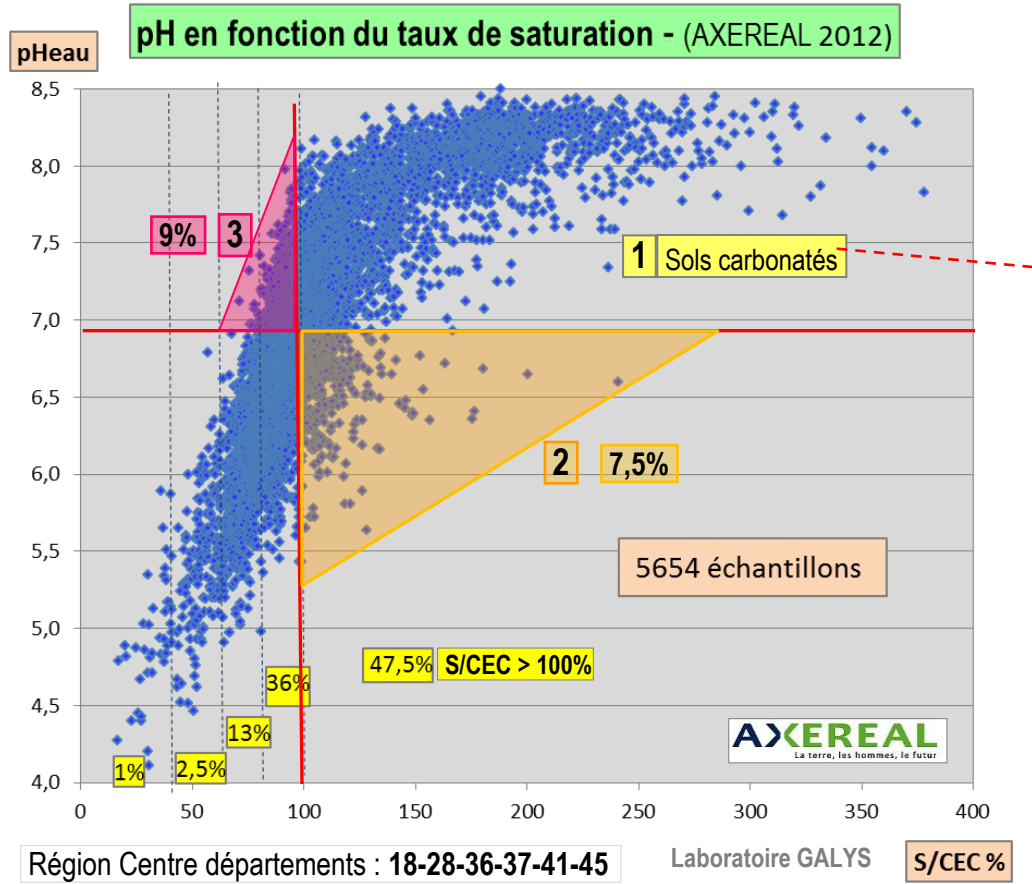
Réf. analyse	Code postal-Commune	pHeau	CaO mg/kg	MgO mg/kg	CEC meq/kg	S/CEC %	CaCO3 total g/kg
2013035504	59163 THIVENCELLE	6,3	5977	773	307	84	0



→ Le taux de saturation :

- La relation entre pH et S/CEC

Exemple 1 : Coopérative AXEREA analyses de sol 2012
pHeau en fonction du taux de saturation – 1^{ère} approche



Présence de carbonates en quantité très variable

3 2 Situations avec discordance entre indicateurs pH et S/CEC

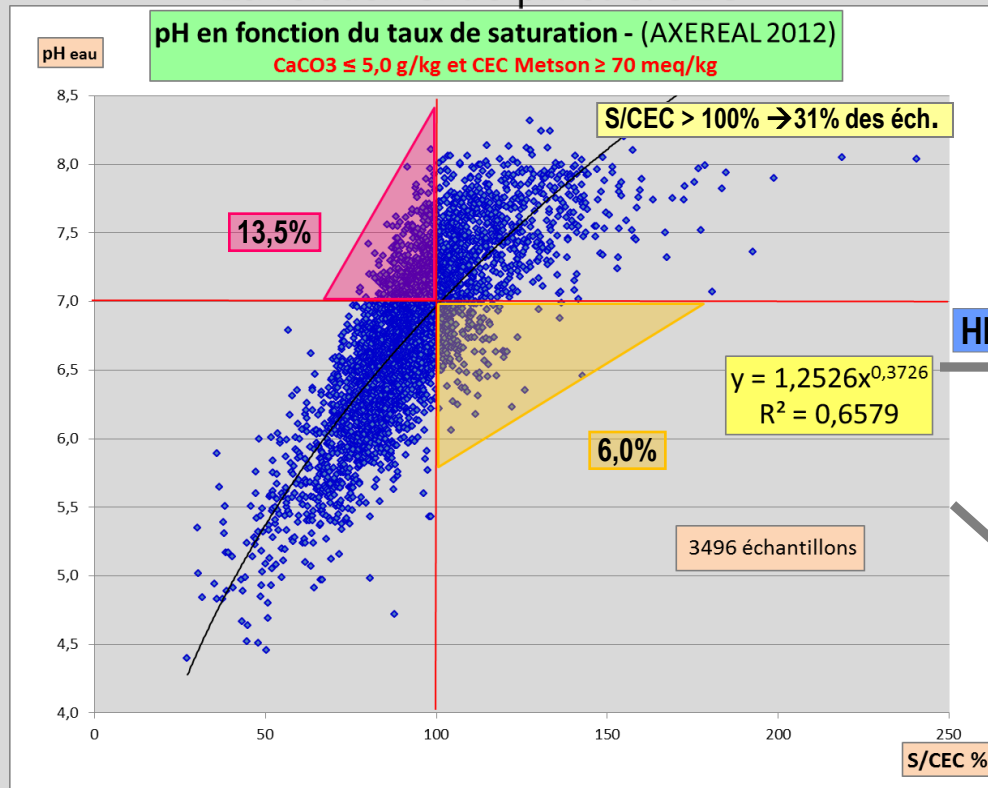
- Analyses avec pH < 7,0 et S/CEC > 100%
- Analyses avec pH > 7,0 et S/CEC < 100%

- 17% d'analyses avec CEC Metson < 70 meq/kg
- CEC considérée comme faible
- Proportion non négligeable des sols étudiés
- Quelle précision de l'indicateur S/CEC dans ces situations ?

→ Le taux de saturation :

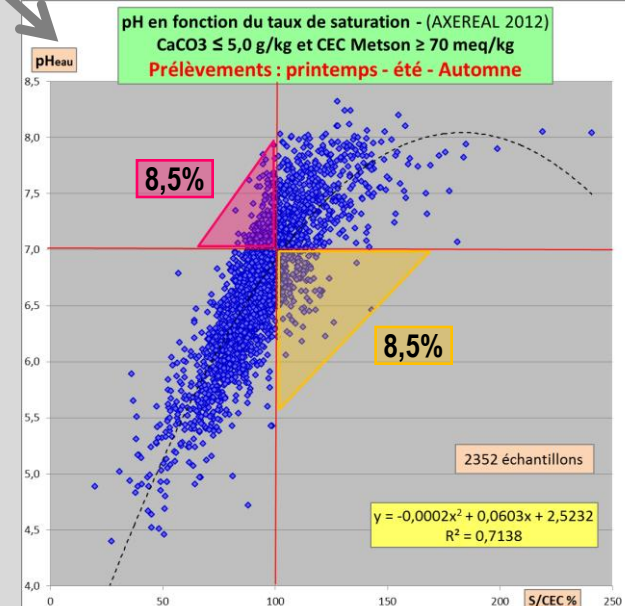
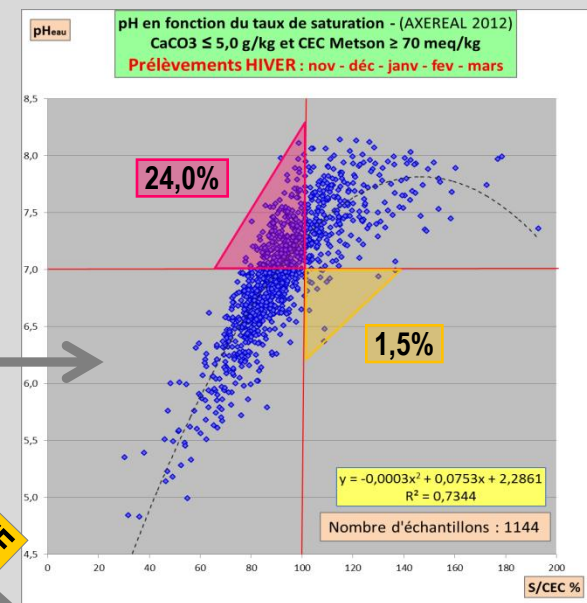
- La relation entre pH et S/CEC

Exemple 1 : Coopérative AXEREA analyses de sol 2012 pHeau en fonction du taux de saturation – 2^{ème} approche



HIVER

ETE



Suppression des éch. avec : - CaCO₃ total > 5,0 g/kg et
- CEC Metson < 70 meq/kg

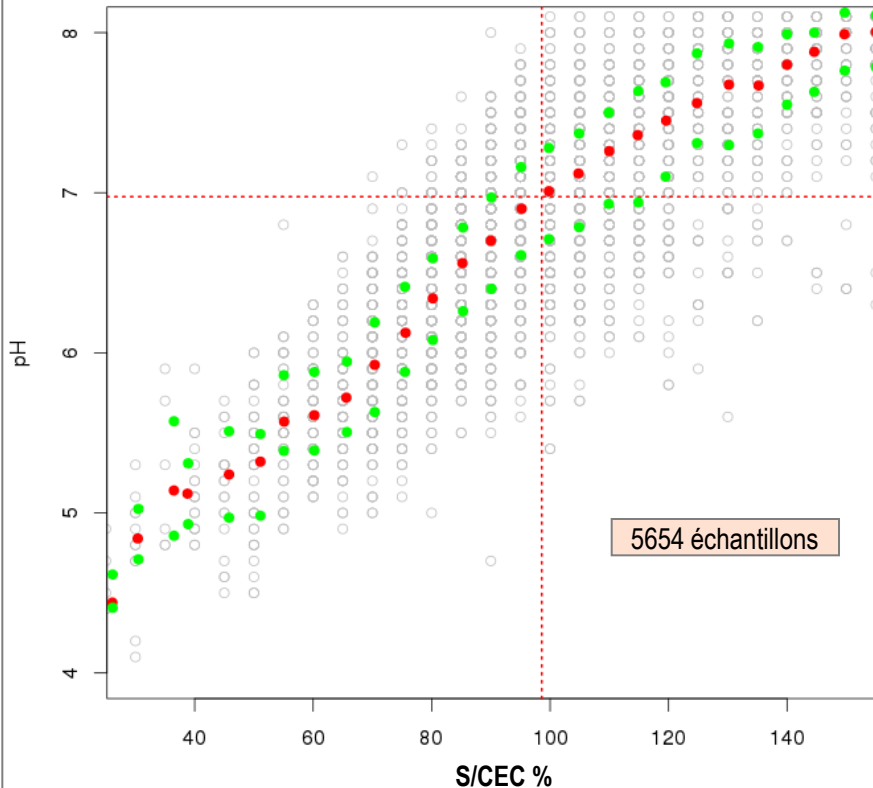
Les prélèvements d'hiver présentent le % le plus important de discordance :
- **pH hiver + élevé**
- **24%** de situations avec : S/CEC < 100% et pH > 7,0

→ Le taux de saturation :

- La relation entre pH et S/CEC

Exemple 1 : Coopérative AXEREA analyses de sol 2012
pHeau en fonction du taux de saturation – 3^{ème} approche

Relation pH S/CEC sur 5654 ind; Correlation : 0.79
Médiane CEC : 98.6 Médiane pH : 6.975

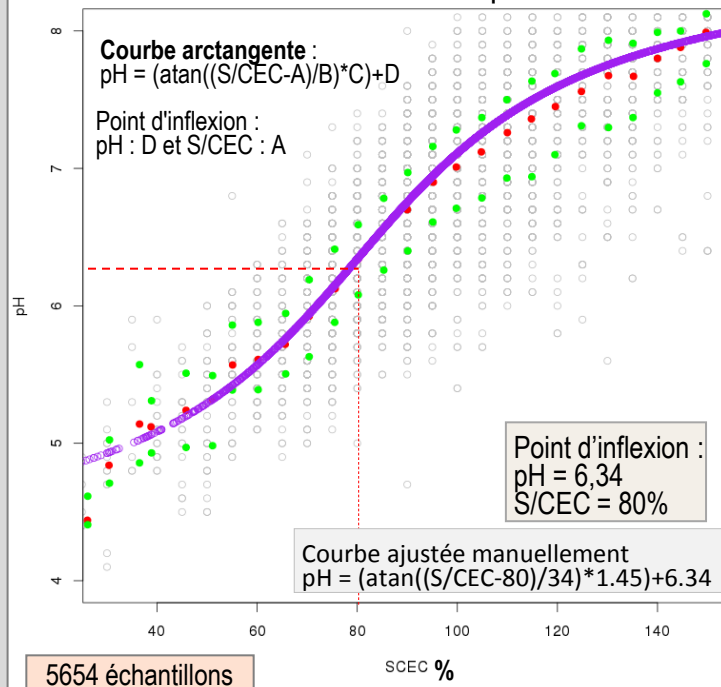


- Nuage de points : inconvéient de mettre en avant la dispersion.
- Empilement des points non perceptible.

Autre approche :

- 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 valeurs entre Q1 et Q3

Relation pH S/CEC sur 5654 ind; Correlation : 0.79
Médiane CEC : 98.6 Médiane pH : 6.975



pH en fonction du taux de saturation - (AXEREA 2012)

- Entre les 2 points verts (*intervalle interquartile*) : 50% des analyses
- Forte densité des échantillons qui suivent approximativement une courbe en "S" (*courbe mauve*).
- Aux extrémités de cette courbe, visualisation des pouvoirs tampon :
 - Carbonate (*sols basiques*) et - Aluminium (*sols très acides*).

→ Le taux de saturation :

- La relation entre pH et S/CEC

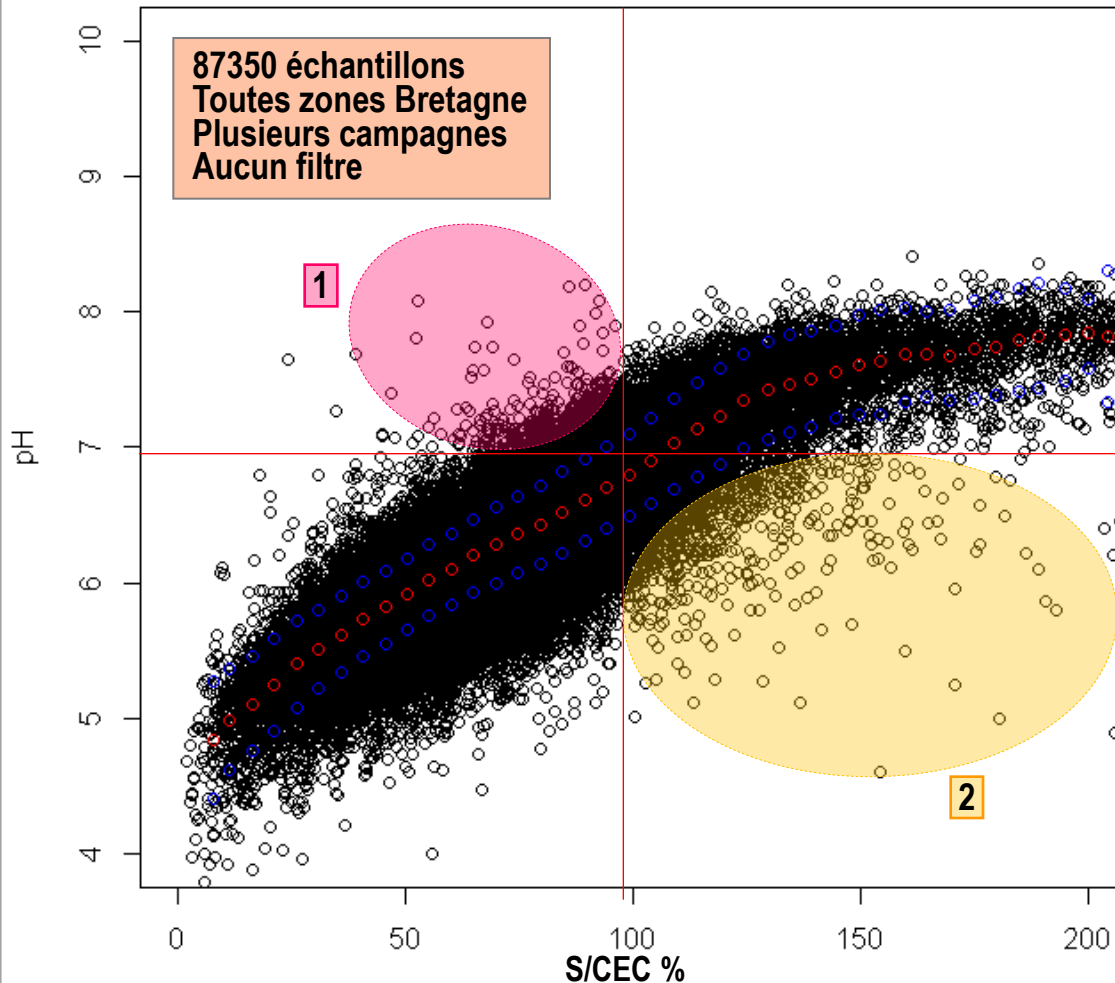
Exemple 2 : Coopérative TRISKALIA analyses de sol
pHeau en fonction du taux de saturation – 1^{ère} approche

Zone Bretagne

Relation pH S/CEC

Triskalia

Etude JF Ribouchon



Approche nuage de points :
Approche qui donne
l'impression d'une dispersion
assez importante.

Approche statistique :
Approche qui met en avant la
relative concentration des
échantillons le long d'une
courbe :

- Point rouge médiane des pH
- Point bleu₁ = 1^{er} quartile = Q₁
- Point bleu₂ = 3^{ème} quartile = Q₃
- 50% des valeurs entre Q₁ et Q₃

Situations avec discordance
entre indicateurs pH et S/CEC

2 analyses avec :
pH < 7,0 et S/CEC > 100%

1 analyses avec :
pH > 7,0 et S/CEC < 100%

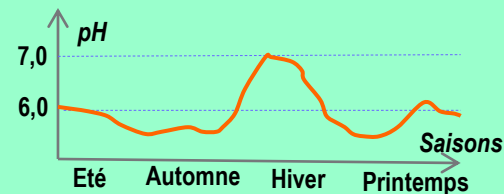
Ces analyses représentent une
proportion de situations
relativement faibles

Autre approche avec tri par Petites Régions Naturelles Agricoles (PRNA)
permet d'améliorer la corrélation pH fonction de S/CEC : R² entre 0,80 et 0,86

Synthèse : Les indicateurs les plus pertinents pour un conseil chaulage

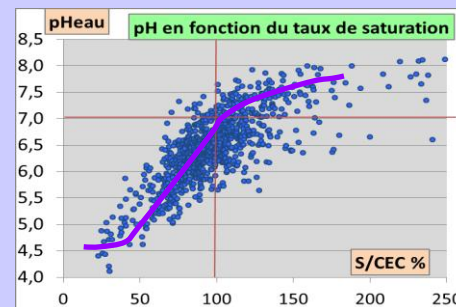
pH_{eau} :

- Forte variabilité saisonnière
- L'interprétation du pH doit nécessairement faire intervenir la date de prélèvement.
- Paramètre analytique essentiel de l'analyse traduisant l'ambiance chimique du sol au moment du prélèvement



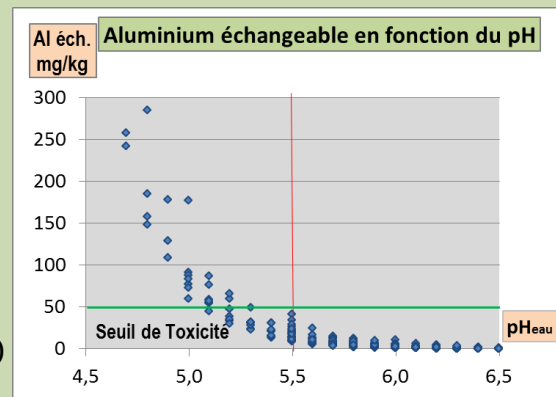
S/CEC :

- Moins sujet aux variations saisonnières
- Assez bien corrélé avec le pH eau
- Pour les faibles CEC (sol sableux – sablo-limoneux), cet indicateur présente une précision insuffisante pour être pertinent
- Quelques situations présentant des discordances entre l'indicateur pH et l'indicateur S/CEC (*explication prochaine diapo*)



Aluminium échangeable :

- Indicateur intéressant dans les situations franchement acides (pH eau < 5,8)
 - 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.
- Difficulté à connaître la réelle proportion d'Al. éch. qui serait séquestrée par la MO



Cas de discordance entre indicateurs de l'acidité :

- Les causes possibles :
- Variations saisonnières du pH
 - La présence de carbonates résiduels
 - La précision des mesures

1- Variations saisonnières du pH_{eau}

Une explication des situations avec pH_{eau} > 7,0 et S/CEC < 100%

Remontée plus ou moins importante du pH durant les **mois d'hiver**.

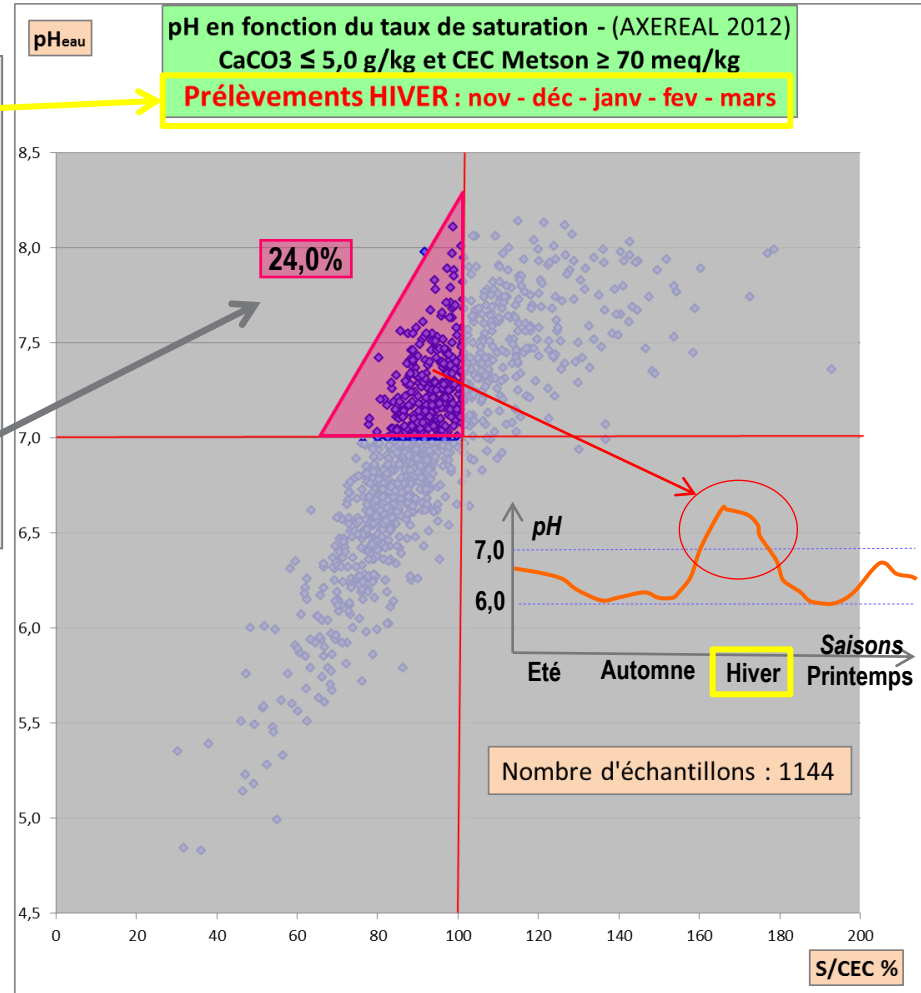
Abaissment de la température
Activité réduite des micro-organismes et racines.

Concentration en acide carbonique H₂CO₃ qui diminue : conséquence de la remontée du pH.

Parallèlement, la teneur en CaO échangeable subit peu de variation.

Phénomènes pouvant être une des causes de discordance entre les indicateurs pH et S/CEC.

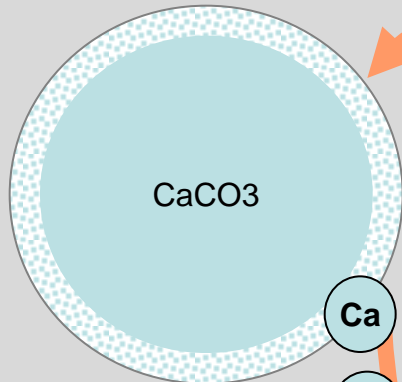
Paysage hivernal du Lauragais (31)



Cas de discordance entre indicateurs de l'acidité : → Les causes possibles

2- La présence de carbonates résiduels → Une explication des situations avec $S/CEC > 100\%$ et $pH_{eau} < 7,0$

Particules de carbonate de calcium
Histoire de la parcelle : amendements calciques anciens ou autres (fientes de poules pondeuses)

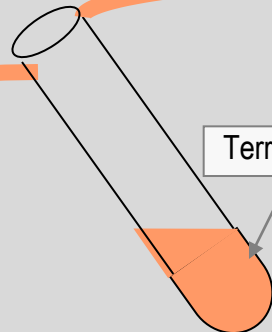


L'extractif dissout en surface la particule de carbonate

Calcium issu des particules de carbonates

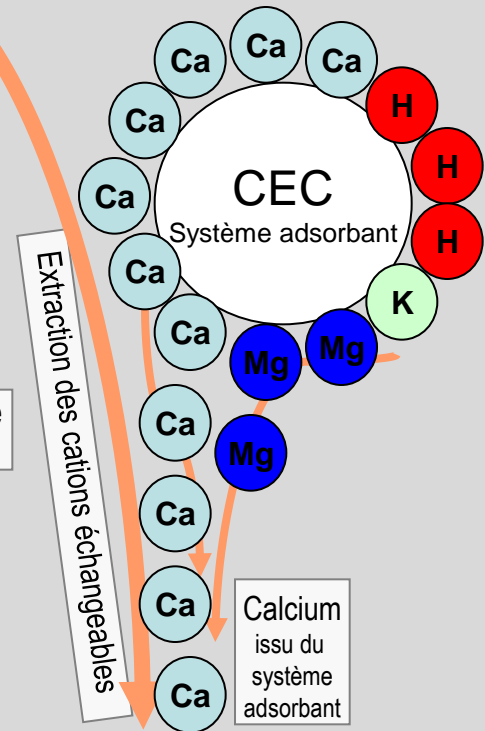
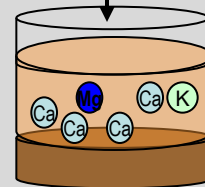
Situation de sols non carbonatés
Aucune réaction à l'apport d'HCl

Dans certaines situations, la présence de particules de carbonate non dissoutes entraîne une surestimation du calcium échangeable (CaO échangeable) et donc une surestimation de Ca/CEC (S/CEC saturé)

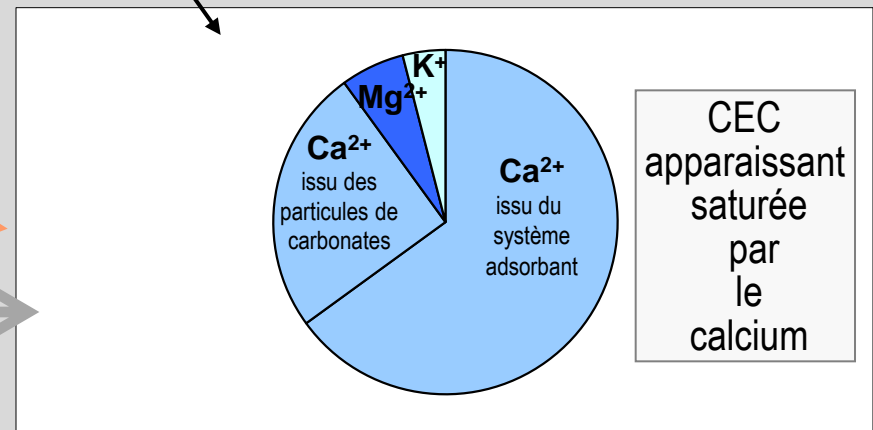


Extractif Acétate d'ammonium

Agitation, décantation, dosage des cations échangeables



Calcium issu du système adsorbant

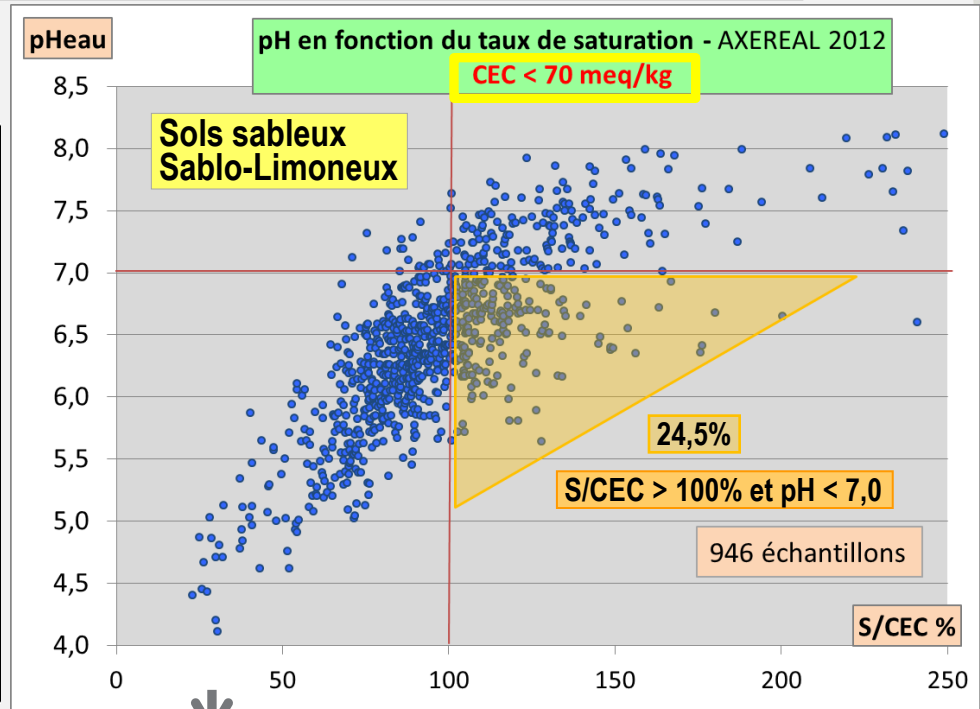


Cas de discordance entre indicateurs de l'acidité : → Les causes possibles

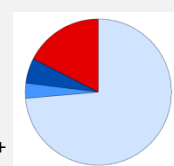
3- La précision des mesures → Une explication des situations avec $S/CEC > 100\%$ et $pH_{\text{eau}} < 7,0$

Exemples de 2 analyses avec $S/CEC = 80\%$
 → 1- Sol Sablo-Limoneux CEC faible
 → 2- Sol argileux CEC élevée

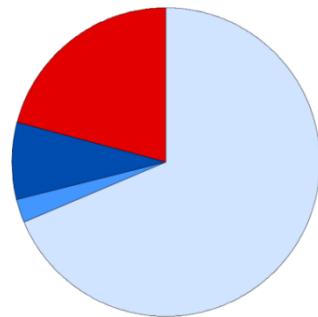
TEXTURE	Sablo-limoneuse	Argileuse
Référence parcelle	Exemple 1: 2012072737 parcelle COUDRAY	Exemple 2 : 2012070268 parcelle PIECE DE LA VIGNE
C.P commune	45250 OUZOUEUR SUR TREZEE	36220 TOURNON ST MARTIN
Paramètre (unité)	CEC FAIBLE	CEC ELEVEE
CaO(mg/kg)	1002	3873
K2O (mg/kg)	80	247
MgO (mg/kg)	52	332
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



- Ca²⁺
- K⁺
- Mg²⁺
- Na⁺
- H⁺



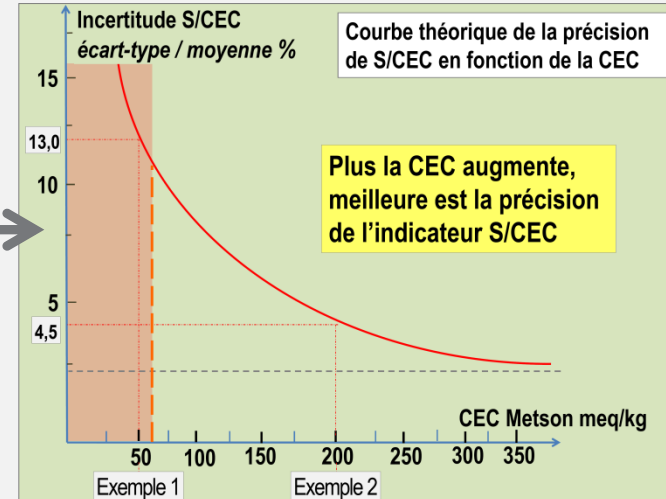
Précision médiocre de l'indicateur S/CEC



Bonne précision de l'indicateur S/CEC

Sol sableux ou sablo-limoneux : raisonner le chaulage à partir de l'indicateur pH_{eau} seul *

Sol sableux ou sablo-limoneux
 → faible CEC_{Metson}
 → Indicateur S/CEC précision médiocre
 → S/CEC peut être
 - surestimé
 - sous-estimé
 → D'où discordances avec l'indicateur pH_{eau}



* Voir Brochure chaulage fiche technique sols sableux

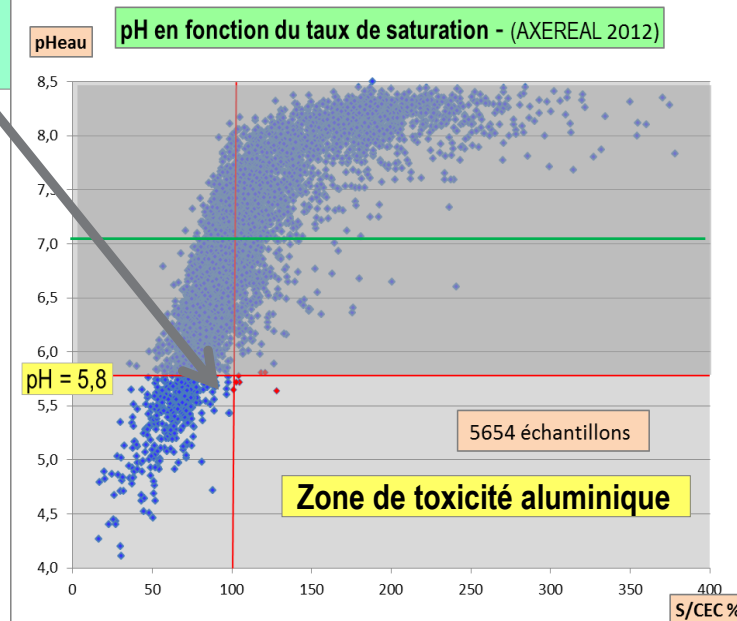
→ Conclusions : quelles décisions pour un conseil ?

En sol acide ($\text{pH}_{\text{eau}} < 5,8$: zone de risque de toxicité aluminique) les indicateurs pH_{eau} et S/CEC vont toujours dans le même sens

Indicateurs pH_{eau} et Taux de Saturation (S/CEC) sont **relativement bien corrélés**.

Ces 2 indicateurs peuvent être discordants :

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



Indicateur Taux de Saturation (S/CEC) de **précision médiocre pour les sols à faible CEC (Sable / sable limoneux)**.

→ **Raisonner le chaulage à partir de l'indicateur pH_{eau}**

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

Sable – sable-Limoneux Parcelle en sol sableux Landes (33)
CEC Metson < 60 meq/kg ou 6 cmol+/kg



Si **discordance** entre indicateurs pH_{eau} et S/CEC, le conseil sera basé sur une **politique intermédiaire**.

Pratique de l'amendement, **compromis entre** : → **coût économique** (risque d'en apporter trop).

→ **risque d'inefficacité** (risque de ne pas en apporter assez).