

comifer



11<sup>èmes</sup>

RENCONTRES

de la fertilisation raisonnée et de l'analyse



11<sup>èmes</sup> 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 :
  - $\text{pH}_{\text{eau}}$  -  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  -
  - 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



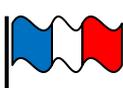
## Les indicateurs de l'acidité :

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

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  $pH_{\text{eau}}$ .**

Dans les pays anglo-saxons il est utilisé  $pH_{\text{CaCl}_2}$  - solution de  $\text{CaCl}_2$  ( $c = 0.01 \text{ mol L}^{-1}$ ).



Echantillons positionnés sur pH mètre

**Signification de cette mesure :**

- Dans le sol les flux de protons sont permanents
- La mesure du  $pH_{\text{eau}}$  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

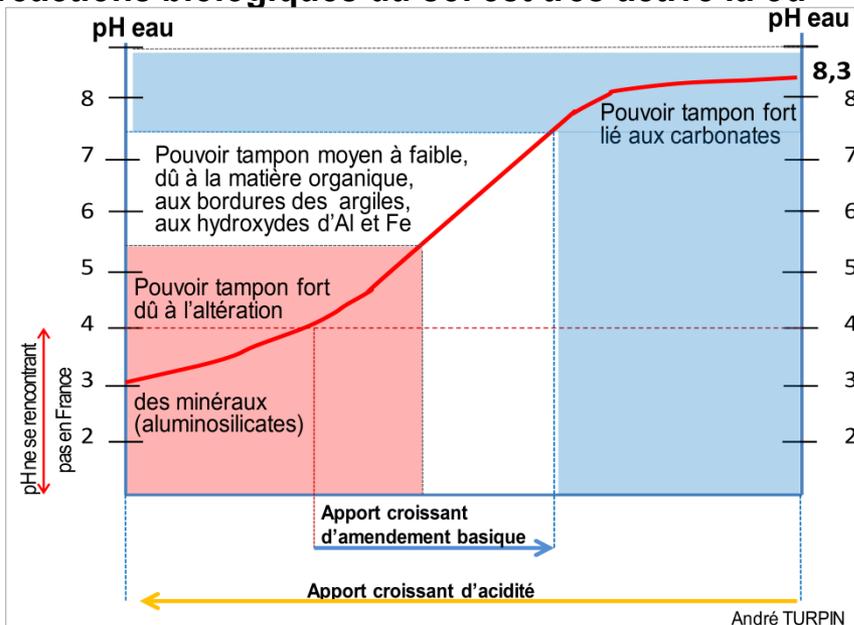
**Le sol va s'opposer à la variation du pH, grâce à son pouvoir tampon :**

- 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  $\text{CaCO}_3$ .**



André TURPIN

# → Le pH<sub>eau</sub>

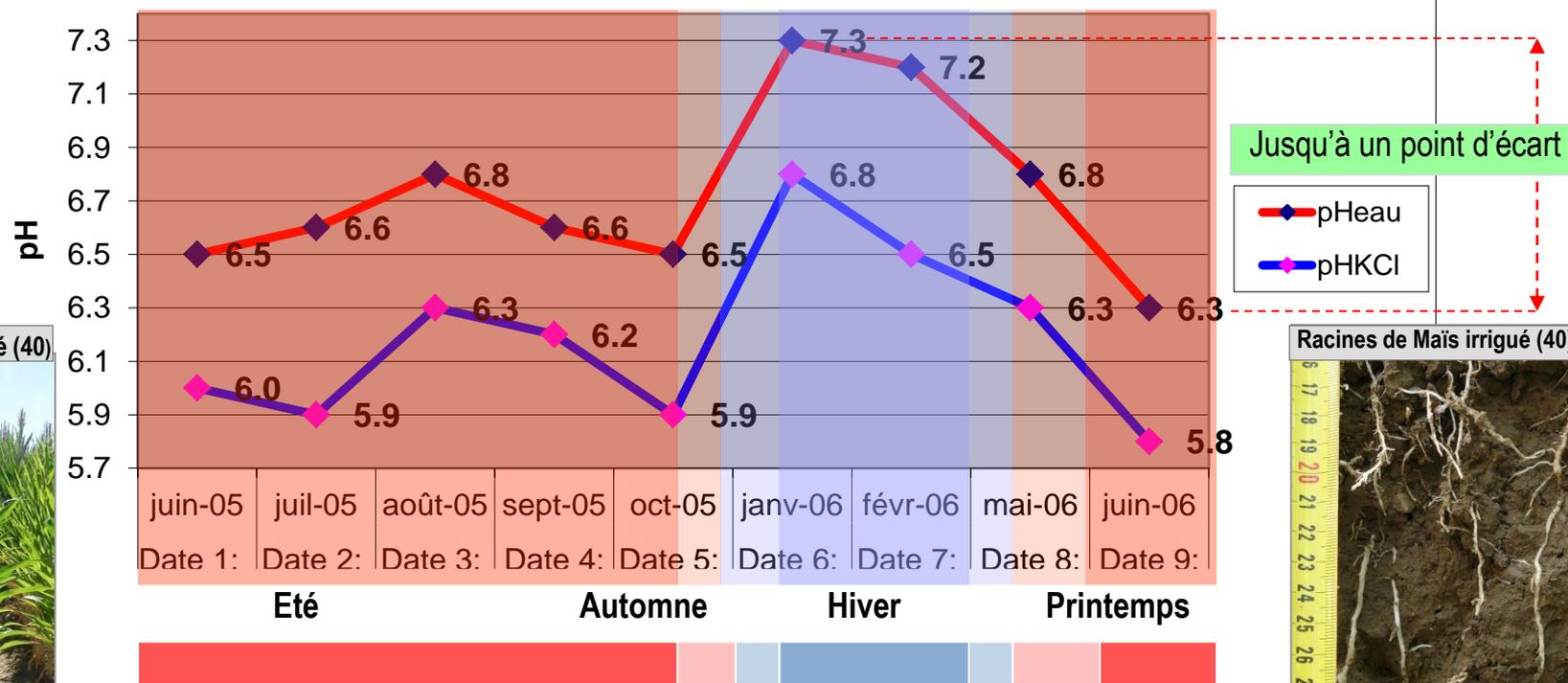
## Variations saisonnières de l'indicateur pH<sub>eau</sub>

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

Exemple d'un suivi du pH<sub>eau</sub> et pH<sub>KCl</sub> 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



Mais irrigué (40)



Racines de Maïs irrigué (40)



## → Le pH<sub>eau</sub>

### Variations saisonnières de l'indicateur pH

#### Explications :

##### Printemps, été et automne :

- Respiration des microorganismes et des racines (CO<sub>2</sub>)
- Augmentation de la concentration en acide carbonique (2 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + 2 H<sup>+</sup>) 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

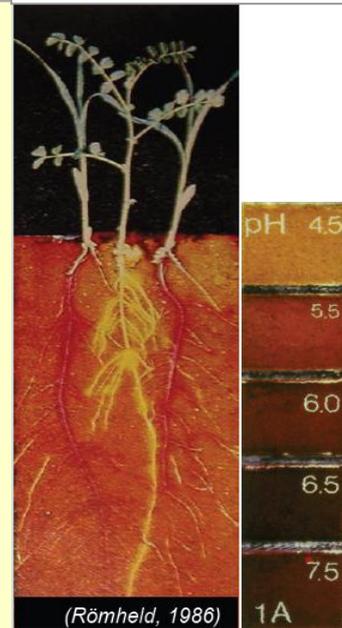
- cette remontée peut être partielle s'il y a lixiviation des ions hydrogénocarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

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 :



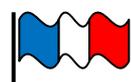
Acidification de la rhizosphère



# Les indicateurs de l'acidité :

## → Le $\text{pH}_{\text{KCl}}$ :

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



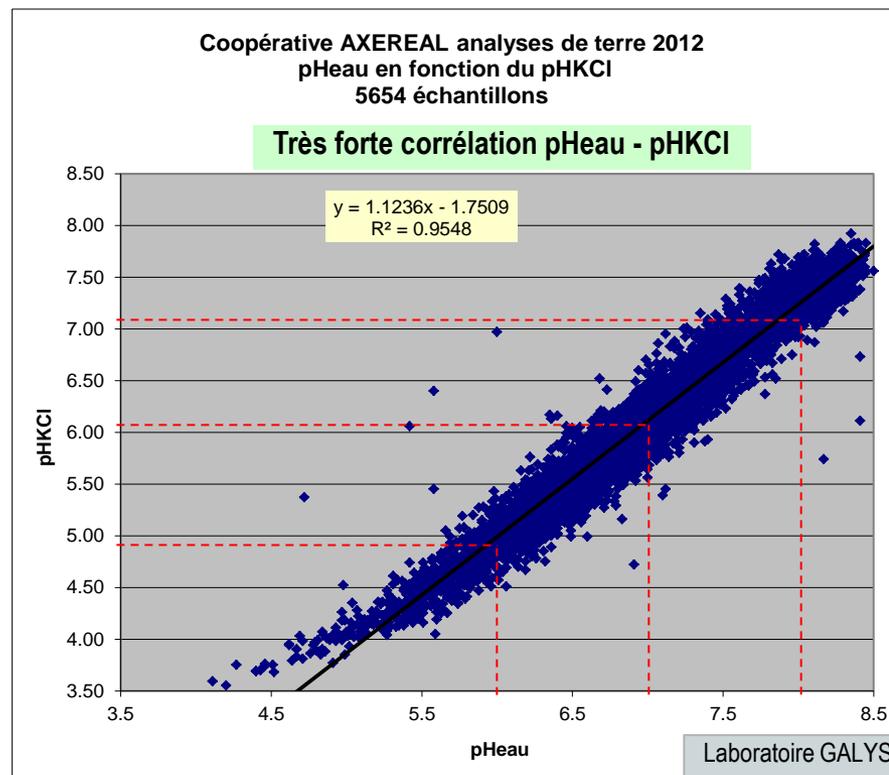
**Les sols français présentent un  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  toujours inférieur au  $\text{pH}_{\text{eau}}$ .**

- 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  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  a une variation saisonnière similaire à celle du  $\text{pH}_{\text{eau}}$ .

- Il est faux de dire :  
« Le  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  indique la valeur minimale que le  $\text{pH}_{\text{eau}}$  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 :  $Al(OH)_2^{2+} + H^+ \rightarrow Al^{3+} + H_2O$

→ 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

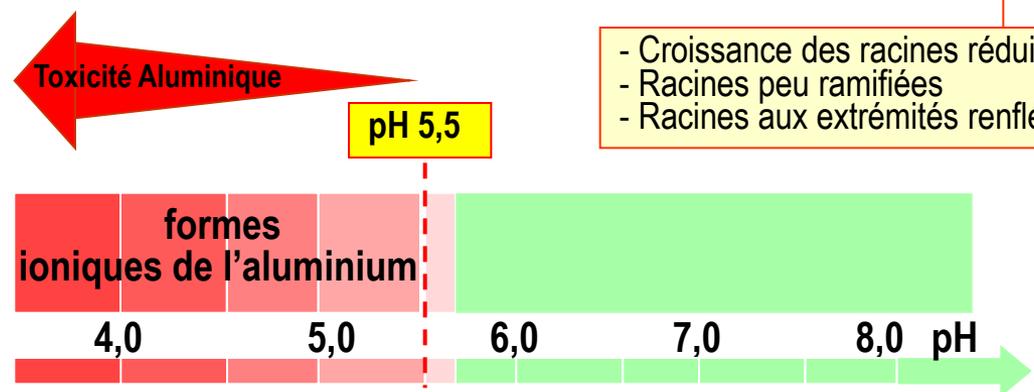
Toxicité aluminique - blé dur (81)

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

Teneur Al éch. > seuil toxicité

**pH<sub>eau</sub> = 4,7**

**pH<sub>KCl</sub> = 4,3**

**CaO échangeable = 480 mg/kg**

**Taux de saturation (S/CEC) = 20%**

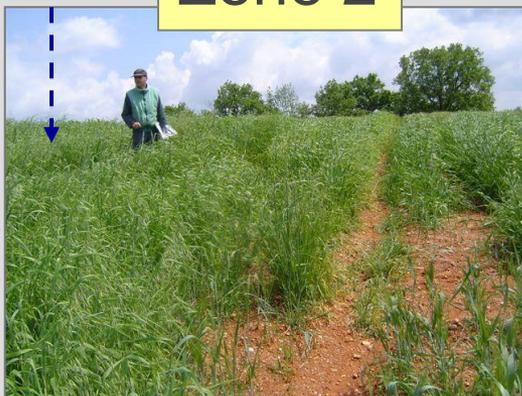
→ L'Aluminium Echangeable (Al. éch.) :

Exemple de toxicité aluminique

Folle avoine, le blé a disparu



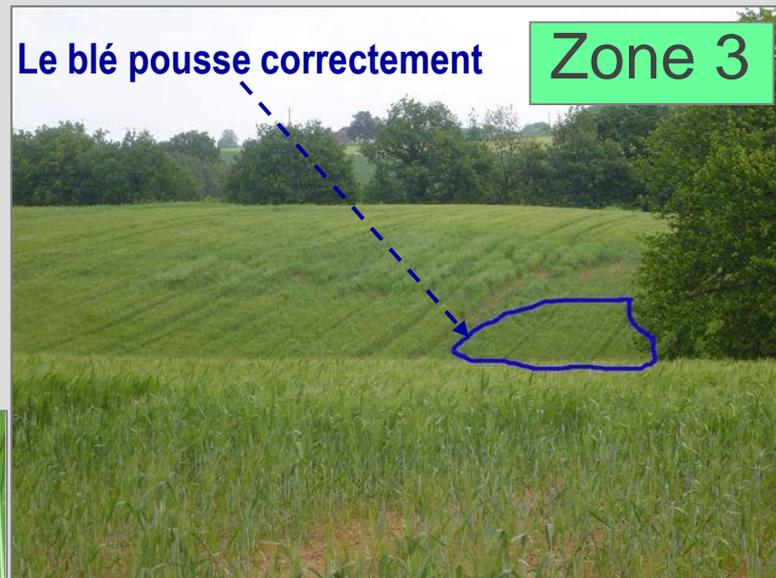
Zone 2



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

Le blé pousse correctement

Zone 3



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
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

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

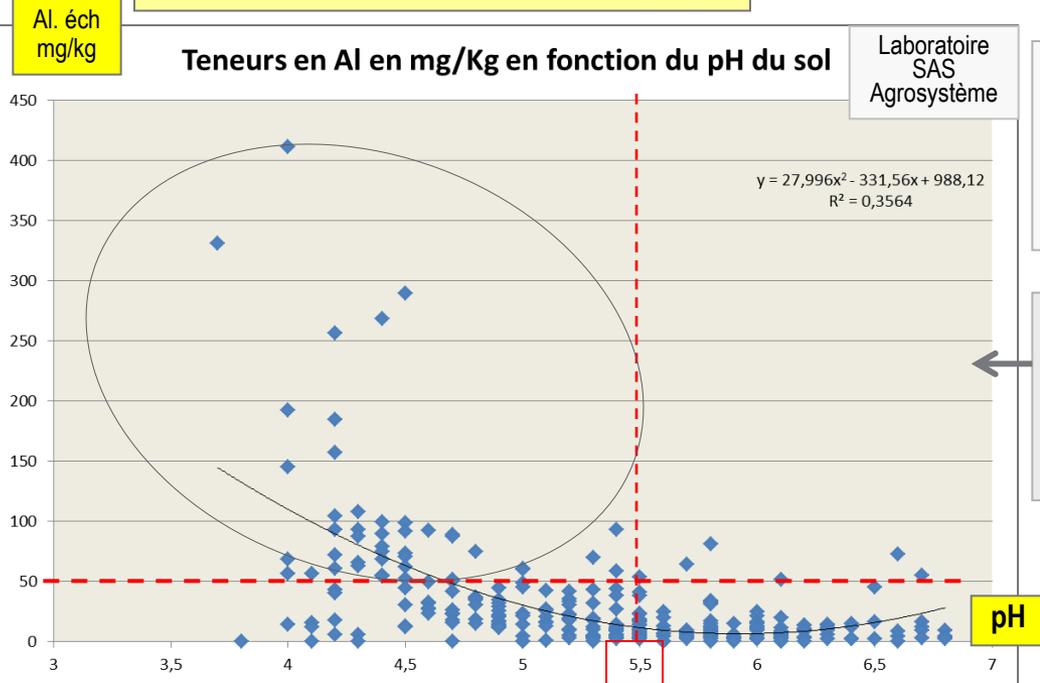
$pH_{eau} = 5,9$        $pH_{KCl} = 5,1$   
 CaO échangeable = 1257 mg/kg  
 Taux de saturation (S/CEC) = 60%

Al éch. = 6,5 mg/kg

Seuil toxicité aluminique : 50 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

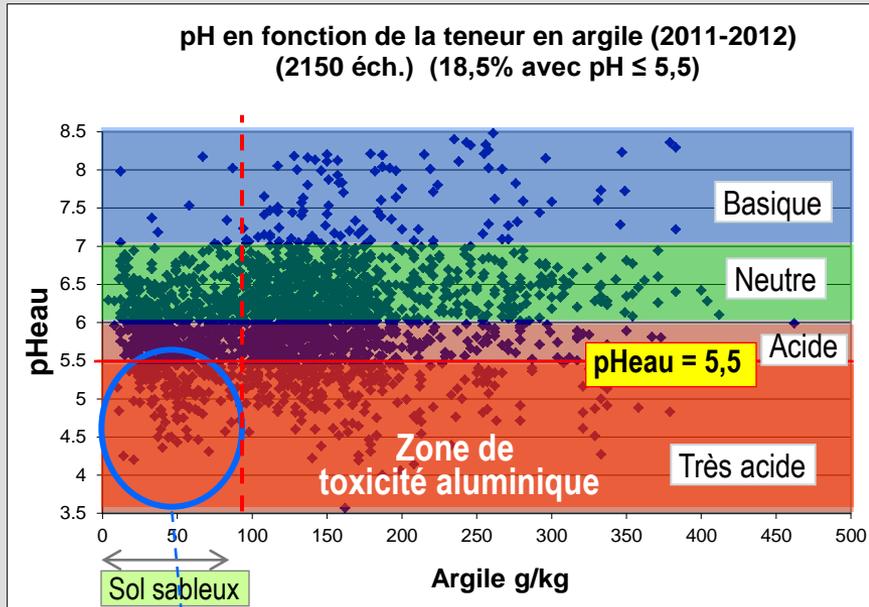
$BEB = (teneur\ Al) \times 3,11 \times 10^{-3} \times (Poids\ de\ Terre\ fine\ en\ T/ha)$

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

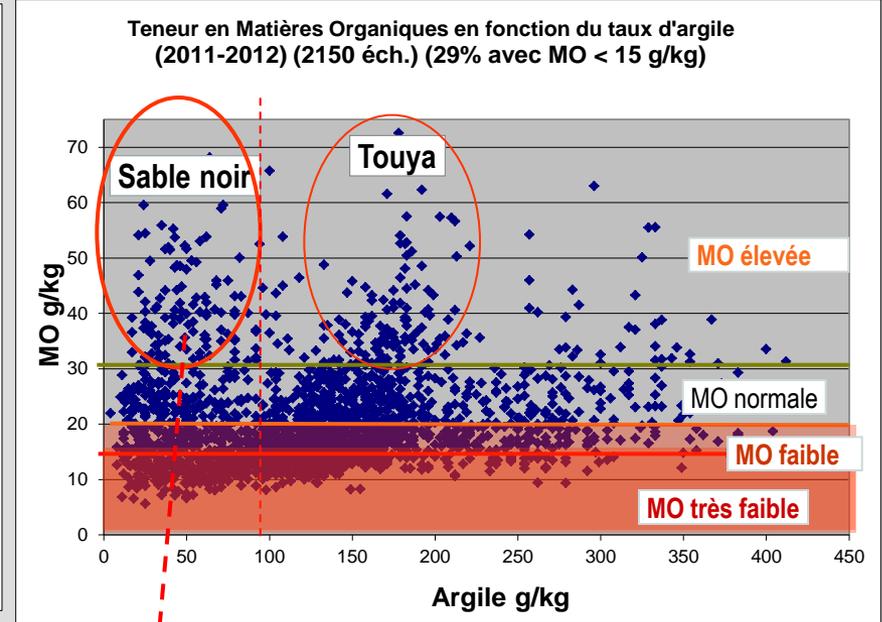
2 - Le BEB pour remonter le pH ou le taux de saturation (selon la méthode)

## → 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<sub>eau</sub> : zone Maisadour 2011-2012**



**Teneurs en Matière Organique :  
Maisadour (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

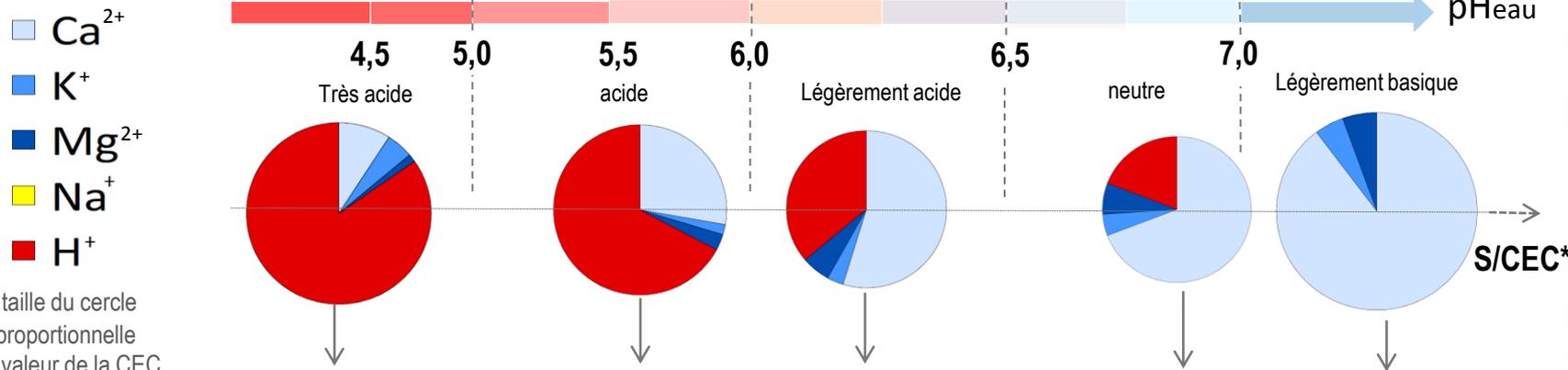
La mesure de la CEC méthode Metson (réalisée à pH 7,0 et non au pH du sol)

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			
<b>S/CEC %</b>			<b>56</b>			

# → Le taux de saturation :

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



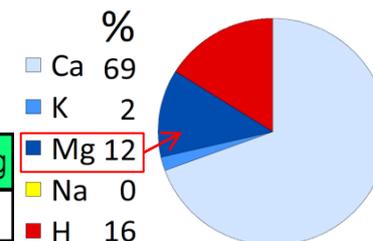
\* La taille du cercle est proportionnelle à la valeur de la CEC

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

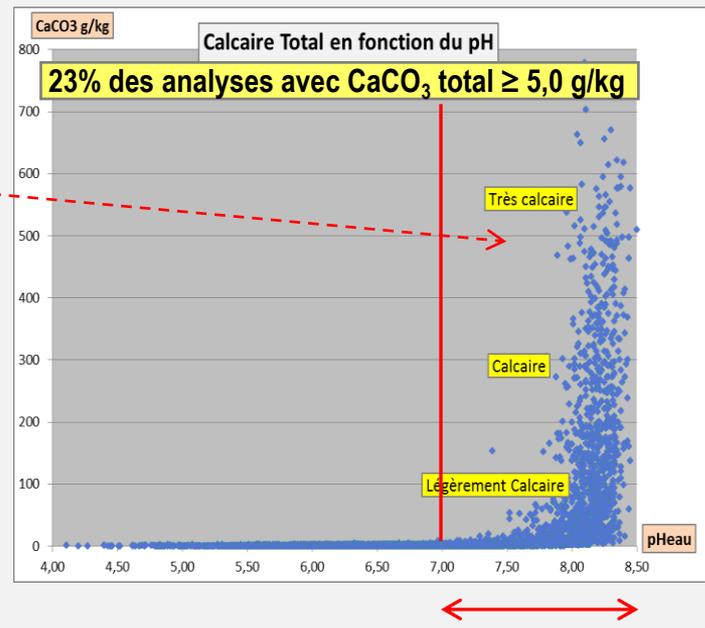
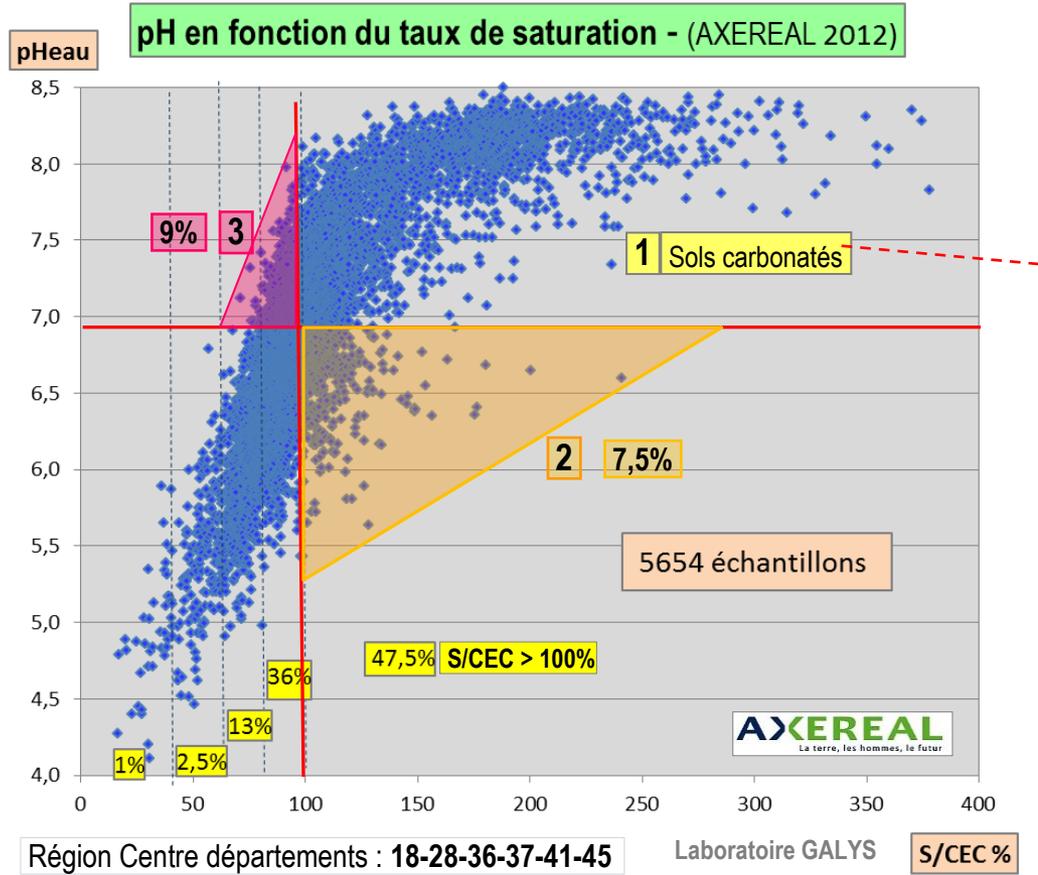
Réf. analyse	Code postal-Commune	pHeau	CaO mg/kg	MgO mg/kg	CEC meq/kg	S/CEC %	CaCO3 total g/kg
2013035504	59163 THIVENCELLE	6,3	5977	773	307	84	0



# → Le taux de saturation :

- La relation entre pH et S/CEC

Exemple 1 : Coopérative AXERREAL analyses de sol 2012  
 pHeau en fonction du taux de saturation – 1<sup>ère</sup> approche



Présence de carbonates en quantité très variable

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

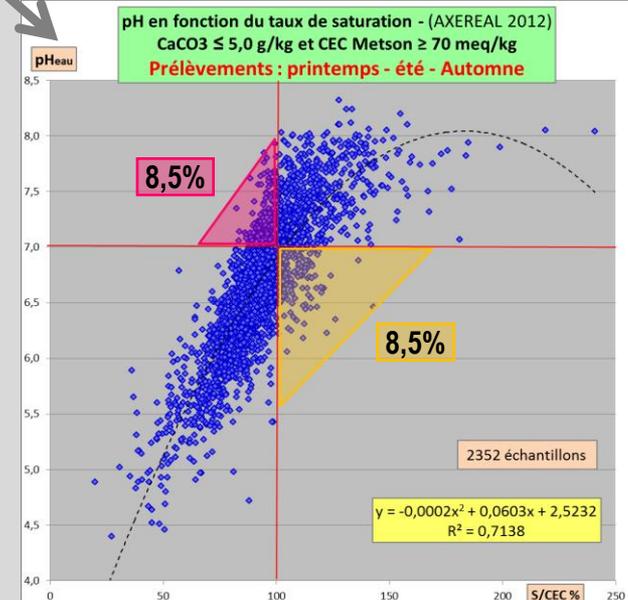
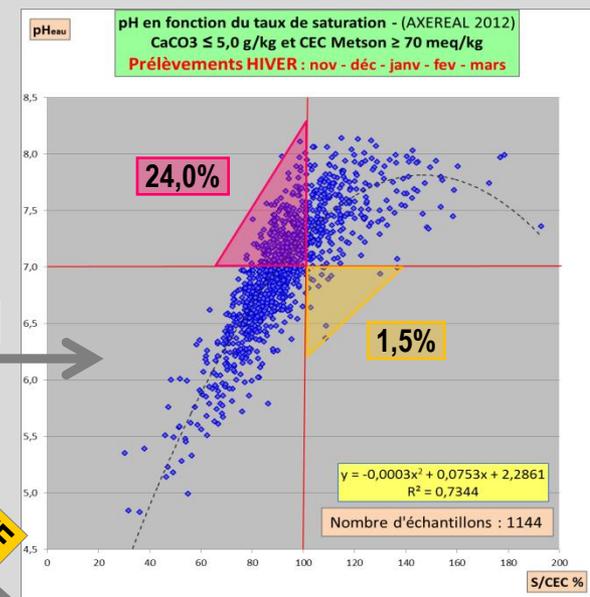
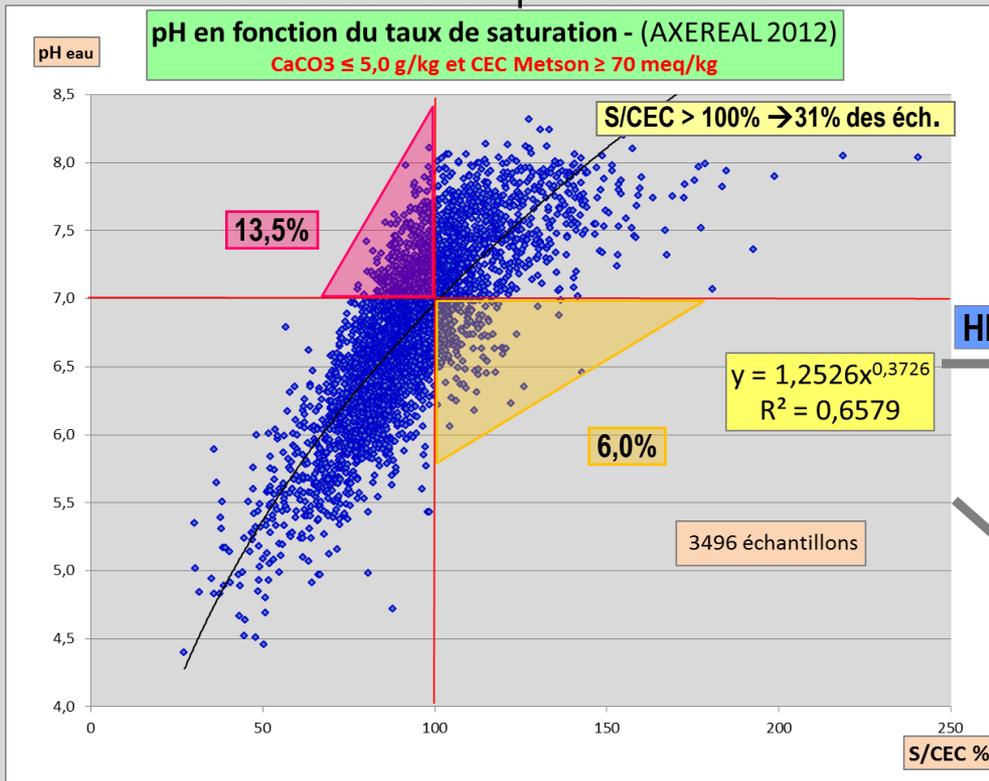
- Analyses avec pH < 7,0 et S/CEC > 100%
- Analyses avec pH > 7,0 et S/CEC < 100%

- 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<sup>ème</sup> approche



Suppression des éch. avec : - CaCO<sub>3</sub> total > 5,0 g/kg et  
- CEC Metson < 70 meq/kg

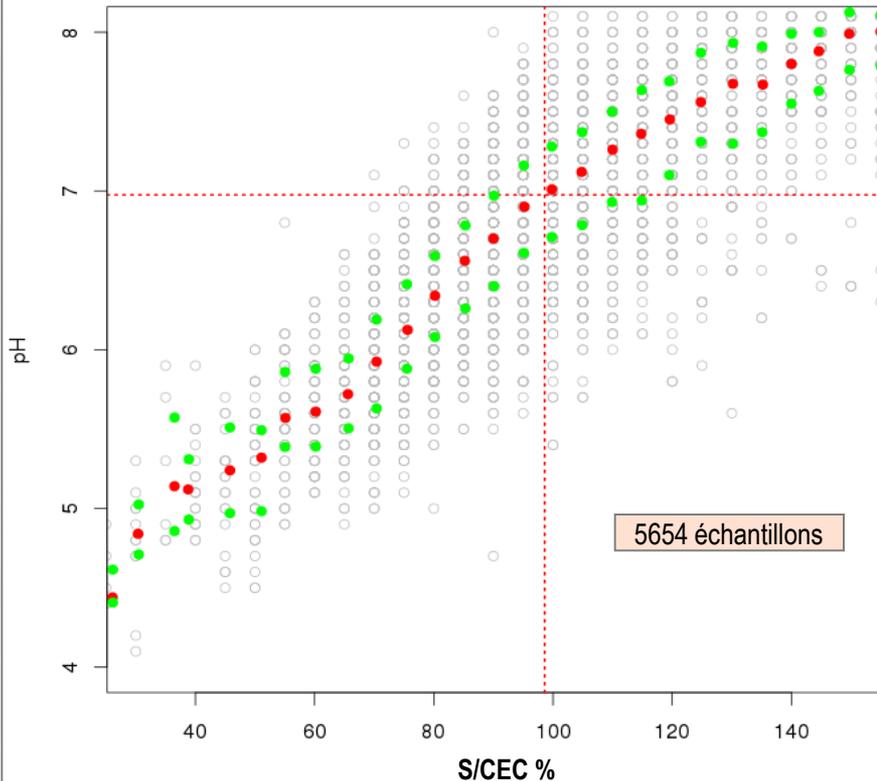
Les prélèvements d'hiver présentent le % le plus important de discordance :  
- **pH hiver + élevé**  
- **24%** de situations avec : S/CEC < 100% et pH > 7,0

# → 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<sup>ème</sup> approche

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

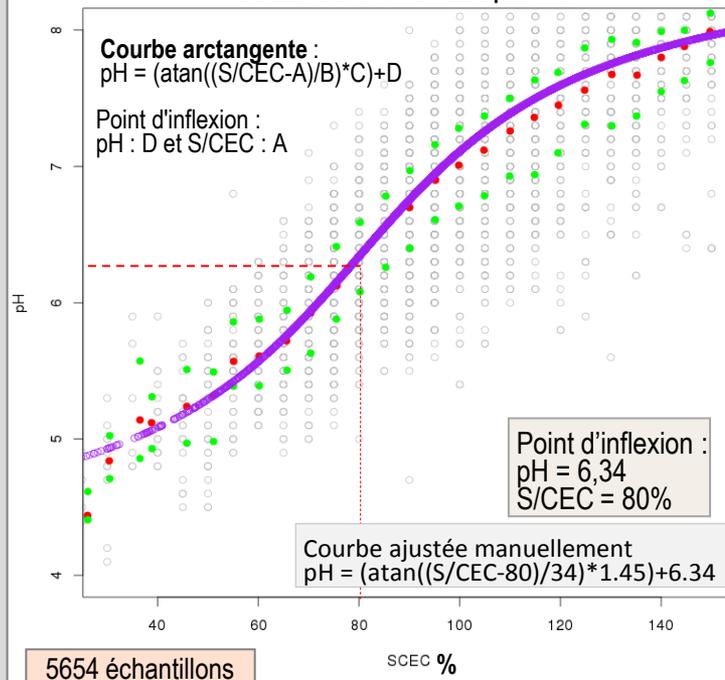


- Nuage de points : inconvéient de mettre en avant la dispersion.
- Empilement des points non perceptible.

Autre approche :

- Arrondis de chaque taux S/CEC à 5% près
- Points rouges = médiane des pH
- Points verts 1 = 1<sup>er</sup> quartile = Q1
- Points verts 2 = 3<sup>ème</sup> 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

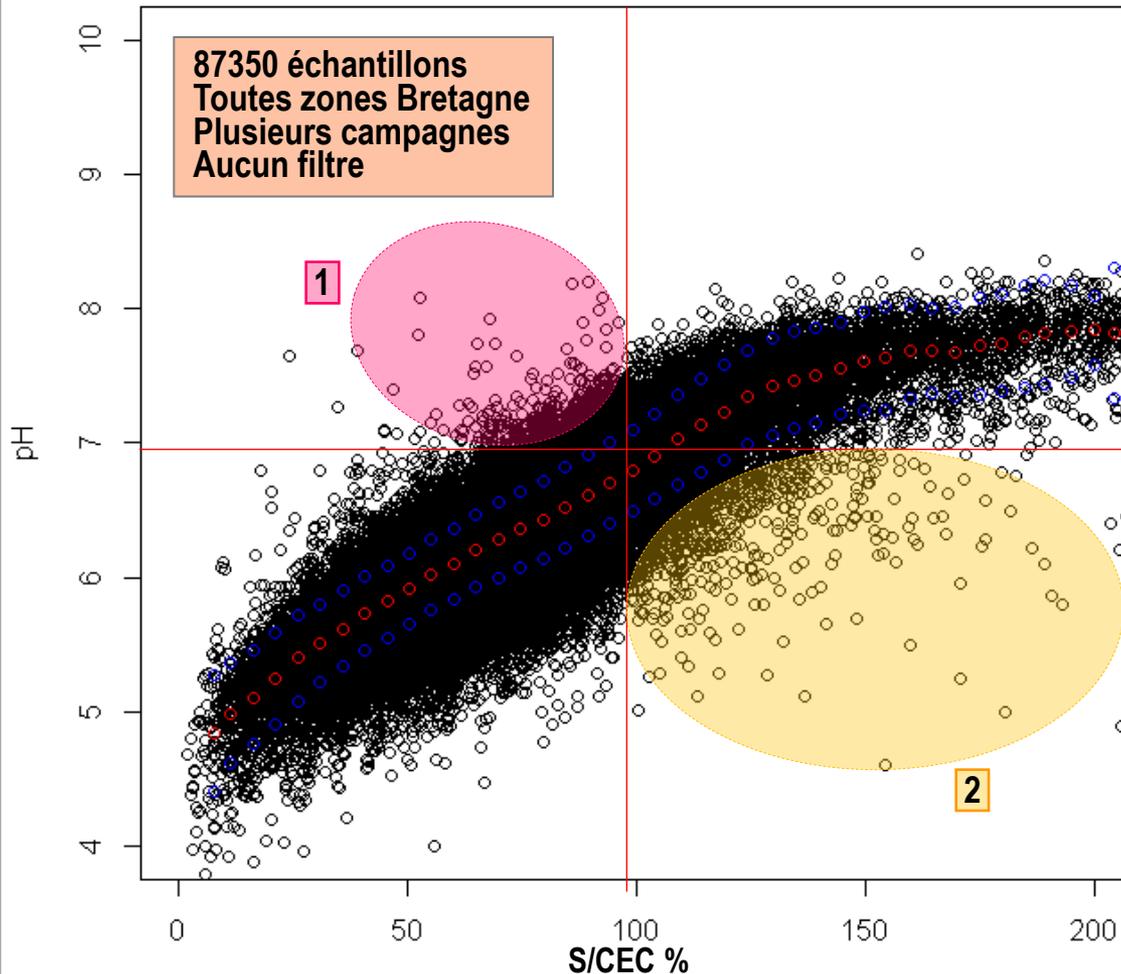
Exemple 2 : Coopérative TRISKALIA analyses de sol  
pHeau en fonction du taux de saturation – 1<sup>ère</sup> approche

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 bleu<sub>1</sub> = 1<sup>er</sup> quartile = Q<sub>1</sub>
- Point bleu<sub>2</sub> = 3<sup>ème</sup> quartile = Q<sub>3</sub>
- 50% des valeurs entre Q<sub>1</sub> et Q<sub>3</sub>

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%

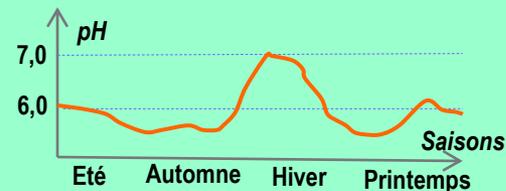
Ces analyses représentent une proportion de situations relativement faibles

Autre approche avec tri par Petites Régions Naturelles Agricoles (PRNA)  
permet d'améliorer la corrélation pH fonction de S/CEC : R<sup>2</sup> entre 0,80 et 0,86

# Synthèse : Les indicateurs les plus pertinents pour un conseil chaulage

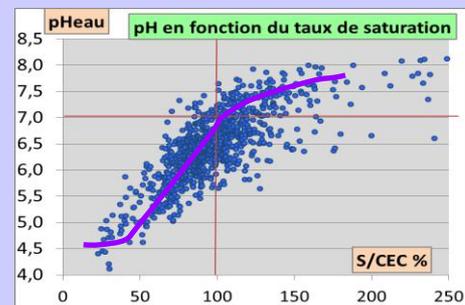
## pH<sub>eau</sub> :

- 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



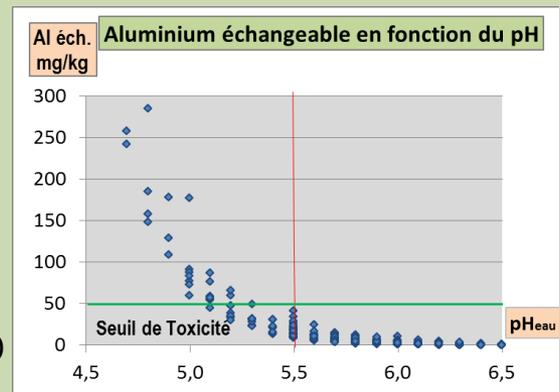
## S/CEC :

- 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<sub>eau</sub>

Une explication des situations avec pH<sub>eau</sub> > 7,0 et S/CEC < 100%

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

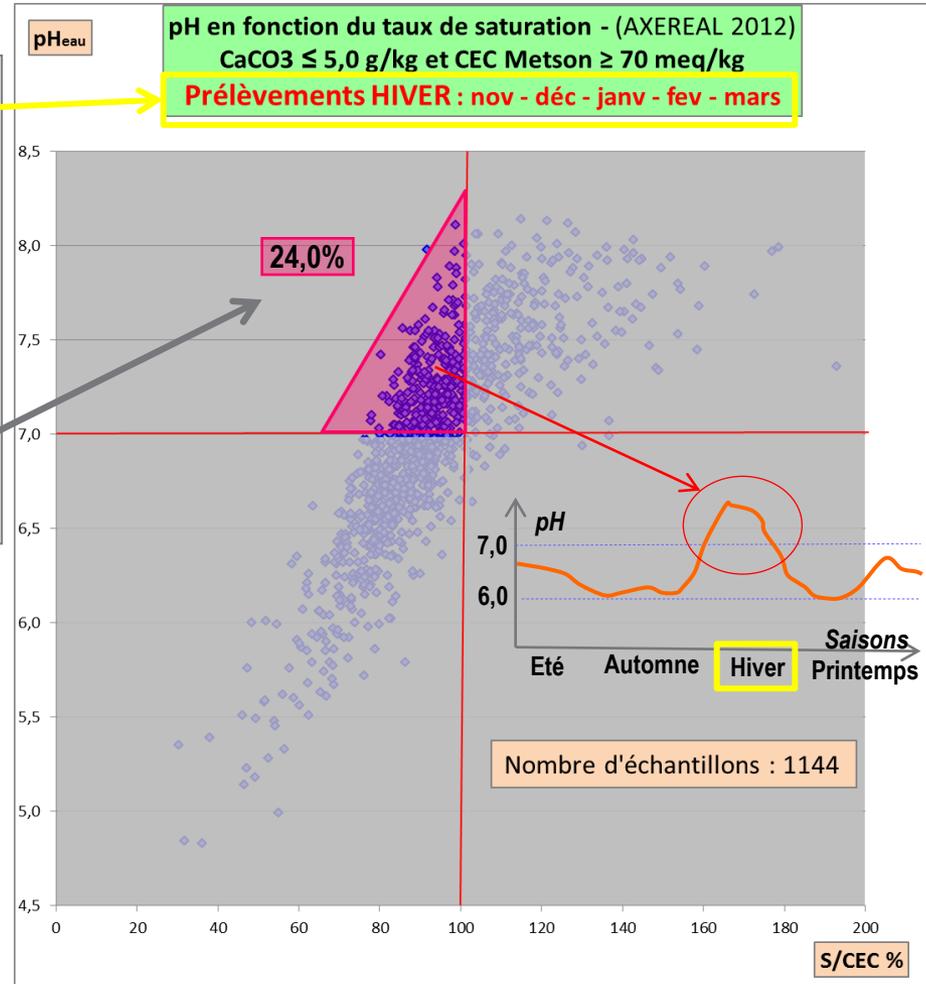
Abaissement de la température  
Activité réduite des micro-organismes et racines.

Concentration en acide carbonique H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 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.

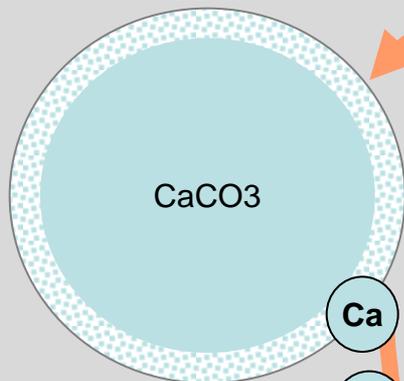
Paysage hivernal du Lauragais (31)



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

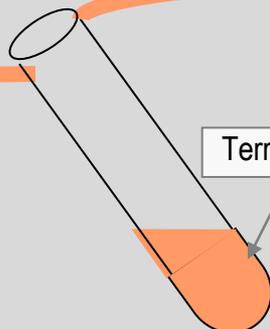
2- La présence de carbonates résiduels → Une explication des situations avec  $S/CEC > 100\%$  et  $pH_{eau} < 7,0$

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



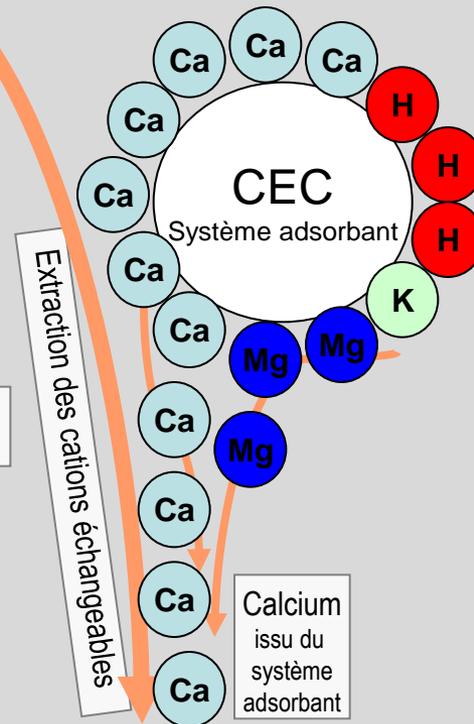
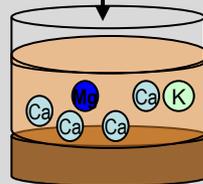
L'extractif dissout en surface la particule de carbonate

Calcium issu des particules de carbonates



Extractif Acétate d'ammonium

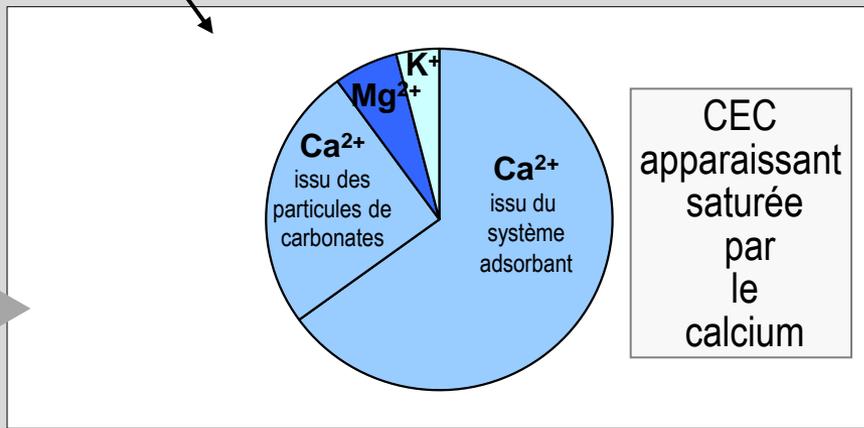
Agitation, décantation, dosage des cations échangeables



Calcium issu du système adsorbant

**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)

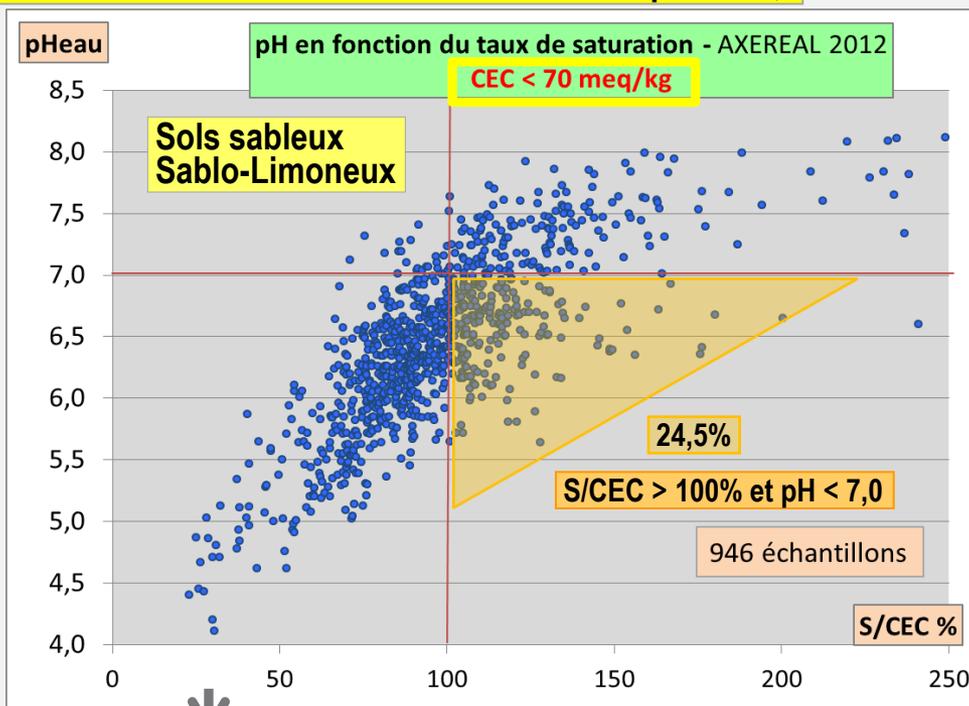


# Cas de discordance entre indicateurs de l'acidité : → Les causes possibles

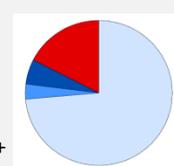
## 3- La précision des mesures → Une explication des situations avec $S/CEC > 100\%$ et $pH_{\text{eau}} < 7,0$

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

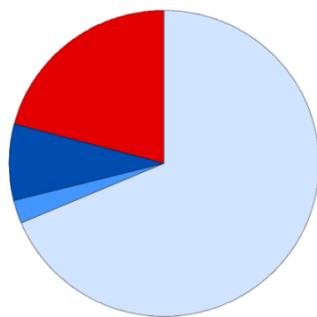
TEXTURE	Sablo-limoneuse	Argileuse
Référence parcelle	Exemple 1: 2012072737 parcelle COUDRAY	Exemple 2 : 2012070268 parcelle PIECE DE LA VIGNE
C.P commune	45250 OUZOUEUR SUR TREZEE	36220 TOURNON ST MARTIN
Paramètre (unité)	<b>CEC FAIBLE</b>	<b>CEC ELEVEE</b>
CaO( mg/kg)	1002	3873
K2O (mg/kg)	80	247
MgO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



- Ca<sup>2+</sup>
- K<sup>+</sup>
- Mg<sup>2+</sup>
- Na<sup>+</sup>
- H<sup>+</sup>



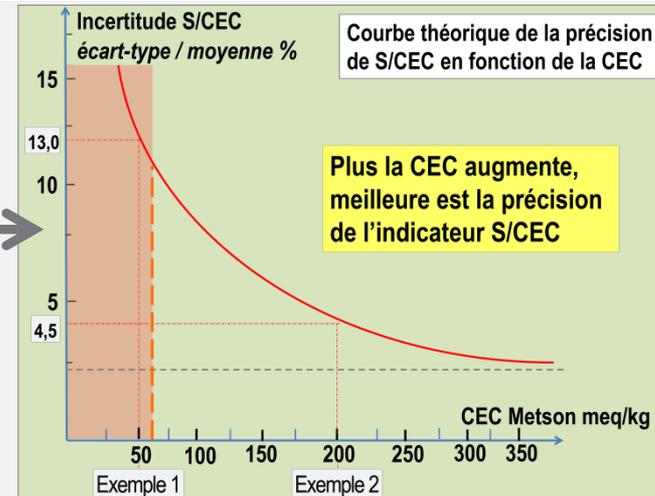
Précision médiocre de l'indicateur S/CEC



Bonne précision de l'indicateur S/CEC

**Sol sableux ou sablo-limoneux : raisonner le chaulage à partir de l'indicateur pH<sub>eau</sub> seul \***

**Sol sableux ou sablo-limoneux**  
 → faible CEC<sub>Metson</sub>  
 → Indicateur S/CEC précision médiocre  
 → S/CEC peut être  
 - surestimé  
 - sous-estimé  
 → D'où discordances avec l'indicateur pH<sub>eau</sub>



\* Voir Brochure chaulage fiche technique sols sableux

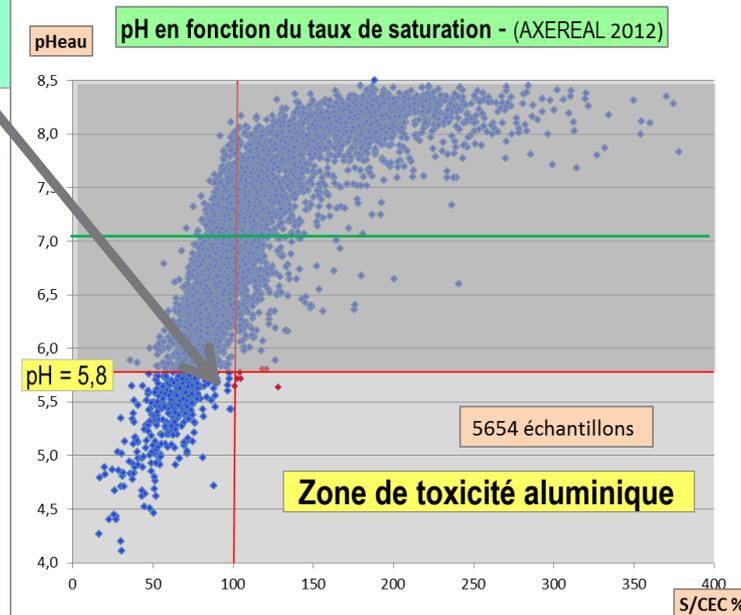
## → Conclusions : quelles décisions pour un conseil ?

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

Indicateurs  $\text{pH}_{\text{eau}}$  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  $\text{pH}_{\text{eau}}$**

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  $\text{pH}_{\text{eau}}$  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).