

## Le sol et la CEC comme facteurs décisionnels pour le chaulage et la fumure :

### *Décision en bref*

*Exemple :*

#### CARTE DE VISITE

Paramètre	Résultat	Interprétation
Gravier	0%	non graveleux
Argile	16.3%	
Silt	27.9%	sol moyen sableux
Sable	55.8%	
MO	1.8%	satisfaisant
pH H2O	5.6	acide
CaCO <sub>3</sub> tot.	1.0%	traces de calcaire

#### CAPACITE D'ÉCHANGE CATIONIQUE

Paramètre	Résultat	Interprétation
CEC	10.2 meq./100g	faible
%sat.	57.4%	
K	5.4%	
Ca	44.6%	
Mg	6.8%	
Na	0.7%	
H	42.6%	

Sur vos analyses de sol, observez dans l'ordre :

1. **CaCO<sub>3</sub>** : au-dessus de 10%, le calcaire est en suffisance dans le sol. En-dessous de 10%, le sol est peu calcaire. Un chaulage peut donc faire sens : il convient d'abord de contrôler le pH (point 2)  
*Exemple : CaCO<sub>3</sub> = 1.0% → Observez les paramètres suivants*
2. **pH** : au-dessus de 6.5, le chaulage n'est en général pas nécessaire. En-dessous, la nécessité de chauler sera déterminée en fonction du taux de saturation et de la CEC (point 3). En dessous de 5.5, le chaulage est en général nécessaire (risques de toxicités et de lessivage des argiles). Attention, le pH est très variable dans l'année, il indique qu'il faut se poser la question de chauler, pas qu'il faut chauler !  
*Exemple : pH = 5.6 → Observez le taux de saturation de la CEC*
3. **Taux de saturation (%sat.) et CEC** : si le taux de saturation est supérieur à 75%, le chaulage n'est pas indiqué. Entre 60% et 75% le chaulage est optionnel, mais la fumure peut nécessiter des corrections (Tableau 3). En-dessous de 60%, le chaulage est utile et sa quantité dépend de la CEC (point 4)  
*Exemple : %sat. = 57.4% et CEC = 10.2 meq./100g → Déterminez la quantité de CaO selon le point 4*
4. **Chaulage** : la quantité de CaO à apporter est déterminée en fonction du taux de saturation et de la CEC selon le Tableau 4. Attention, il n'existe pas de « CaO » pur sur le marché, tous les produits vont être exprimés en « équivalent CaO » ; reste encore à se poser la question de la forme à apporter (fin et disponible, grossier et à action lente, etc.) : cf. chapitre 3 ci-dessous.  
*Exemple : %sat. = 57.4% et CEC = 10.2 meq./100g → Apports de CaO : 12.5 dt/ha, soit par exemple 12.5/50% = 25 dt/ha de calcaire moulu pour une action lente*

## Le sol et la CEC comme facteurs décisionnels pour le chaulage et la fumure

La teneur en bases (cations Ca, Mg, etc.) dans le sol joue un rôle important dans les processus chimiques, physiques et biologiques. En effet, ces bases contribuent à la structuration du sol par la création de « ponts » liant les matières organiques et matières minérales. Elles vont également modifier le pH du sol et ainsi influencer directement la disponibilité des éléments nutritifs.

**Le but premier d'une intervention comme le chaulage est d'optimiser le fonctionnement du sol, et non de corriger un problème supposé de pH, le pH n'étant qu'un indicateur (ce n'est pas un problème en soi, sauf en cas de valeurs très faibles, < 5.5).** Avant toute intervention, il convient de remédier aux problèmes de compaction et de circulation de l'eau qui entravent le bon fonctionnement du sol.

L'importance et la fréquence du chaulage peuvent être déterminées avec des analyses de sol en considérant l'état calcique du sol, le taux de saturation en bases et la capacité d'échange cationique. Attention, ces paramètres ne sont jamais à considérer seuls dans le sol. Il est important de toujours prendre en compte la matière organique, l'activité biologique, ainsi que la stabilité structurale (ex. sur sol battant, sujet à l'érosion ou à structure très peu stable).

### I. Quelques notions théoriques

#### Qu'est-ce qui influence l'état calcique du sol ?

L'état calcique du sol dépend de la nature de la roche-mère dont le sol est issu. Il résulte également de l'effet des précipitations, des eaux de fond et de l'historique cultural du sol. Les sols s'acidifient naturellement en raison de l'acidité des eaux percolant dans le sol (pluies, amendements acidifiants, prélèvement des cultures, etc.) qui entraîne des pertes en calcium. Ces pertes sont en partie contrées par l'effet tampon du sol et par les apports d'engrais de ferme, de recyclage ou du commerce. Toutefois, dans certains cas, un chaulage d'entretien (apports sporadiques de chaux) ou de correction est nécessaire.

#### Qu'est-ce la capacité d'échange cationique (CEC) ?

Il s'agit de la quantité de cations qu'un sol peut retenir à la surface de ses agrégats (complexe argilo-humique) à un pH donné (selon la méthode d'analyse choisie). La CEC est un des indicateurs de la fertilité chimique du sol. Elle indique sa capacité de rétention des éléments nutritifs (sous forme de cations). Généralement, plus un sol est riche en argile et en matière organique, plus sa CEC est importante. Ces deux éléments, chargés négativement, sont liés par des cations (calcium, magnésium, fer, etc.) et forment ensemble le complexe argilo-humique (Fig. 1). Les charges négatives « restantes » (qui ne servent pas aux liaisons argile-humus) confèrent une charge négative à l'ensemble du complexe argilo-humique et vont permettre de fixer les cations ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , ...) de la solution du sol (Fig. 2).

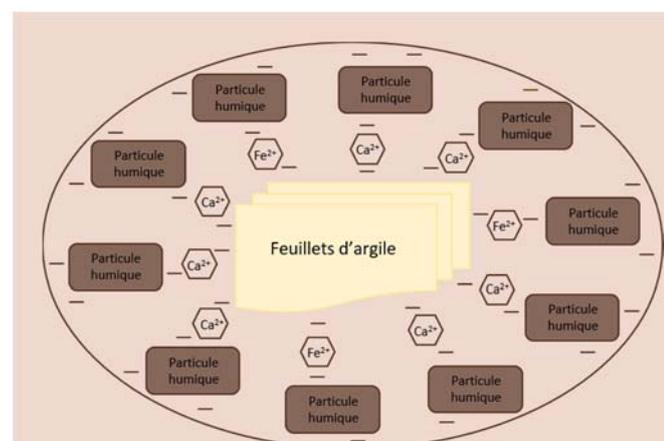
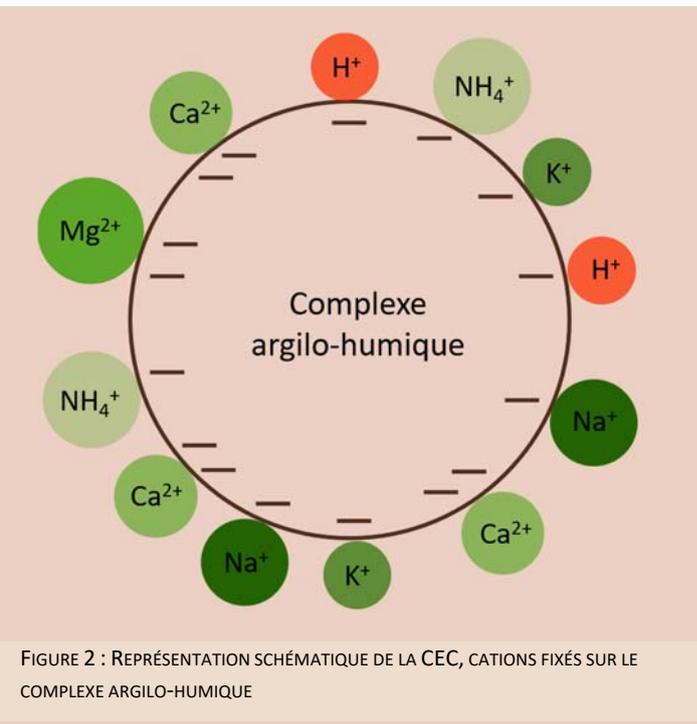


FIGURE 1 : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DU COMPLEXE ARGILO-HUMIQUE



Les cations ainsi fixés sont protégés de la lixiviation (migration des éléments vers le bas du profil). Ils restent disponibles pour les plantes comme éléments nutritifs et peuvent être échangés selon les besoins. Le nombre de « places » (= les charges négatives du complexe argilo-humique) détermine l'importance de la CEC. L'analyse de la CEC renseigne donc sur la taille du réservoir potentiel de fixation de cations. L'interprétation de la valeur de la CEC peut se faire selon le Tableau 1.

TABLEAU 1 : APPRÉCIATION DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE CATIONIQUE CEC (COLLAUD ET AL., 1990)

CEC (méq/100g)	Appréciation de la CEC	Type de sol
0 – 12	Faible	léger
12 – 20	Moyen	moyen
> 20	Fort	lourd

La CEC est dépendante de la texture (teneur en argiles, limons fins) et la teneur en matière organique du sol. En cas de faible CEC, une amélioration de cette dernière ne pourra être envisagée que par le biais d'apports réguliers de matière organique, la teneur en argile ne pouvant être modifiée.

### Qu'est-ce que le taux de saturation et quelles sont les valeurs cibles?

Il s'agit du taux de remplissage du réservoir, c'est-à-dire le pourcentage de sites de la CEC occupés par des cations échangeables : Ca, Mg, K et Na (Fig. 3). Les sites qui ne sont pas occupés par ces cations le sont par des ions d'hydrogène (H<sup>+</sup>) qui ne sont pas nutritifs pour la plante. Le taux de saturation est donc fortement lié au pH du sol. Un sol saturé à plus de 90% possèdera moins de 10% de sites occupés par des ions H<sup>+</sup> ; son pH sera donc alcalin, généralement > 7.5. Un sol saturé à moins de 60% par des cations nutritifs aura par contre un pH acide, de nombreux sites étant occupés par les ions H<sup>+</sup> (Collaud et al., 1990). Idéalement, un taux de saturation de l'ordre de 75% est recherché. Le Tableau 2 donne des valeurs cibles pour les différents cations dans la CEC qui tiennent compte des principaux risques d'antagonisme entre les cations.

La quantité de cations échangeables fixés est toujours à l'équilibre avec les cations de la solution du sol. Chaque apport d'engrais, chaque prélèvement par la plante, et chaque lessivage provoquera donc un rééquilibrage entre ces deux réservoirs et modifiera le taux de saturation. Ces informations doivent être considérées dans le pilotage de la fertilité.

■ = Taux de saturation  
■ + ■ = CEC

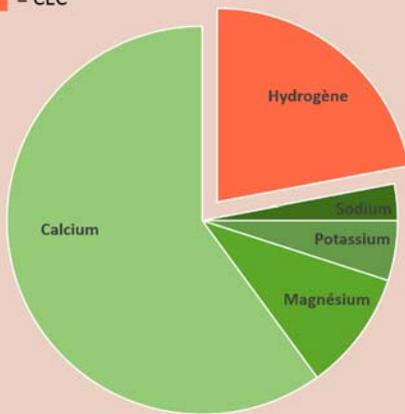


FIGURE 3 : TAUX DE SATURATION DE LA CEC (COLLAUD ET AL., 1990)

TABLEAU 2 : VALEURS CIBLES DE TAUX DE SATURATION POUR LES DIFFÉRENTS CATIONS (COLLAUD ET AL., 1990)

Taux de saturation	
Ca <sup>2+</sup>	60-85%
Mg <sup>2+</sup>	10-15%
K <sup>+</sup>	3-5%
Na <sup>+</sup>	0-3%
H <sup>+</sup>	0-25%

## 2. Comment conduire le chaulage et la fumure en fonction de la CEC et du taux de saturation ?

Avant d'étudier les résultats de l'analyse de la CEC et du taux de saturation, il est important de regarder la teneur en carbonates de calcium (calcaire total, %CaCO<sub>3</sub>) du sol. Si le sol est calcaire, le chaulage est en principe inutile. En effet, ce stock naturel de carbonate se solubilise sous l'effet des acides du sol issus de la pluie, des engrais, des exsudats racinaires et des microorganismes du sol. Ils libèrent des ions calcium qui permettent de compenser les pertes (lixiviation, exportations par les plantes) et des ions carbonates, qui vont neutraliser les ions H<sup>+</sup>.

TABLEAU 3 : INTERPRÉTATION DE LA TENEUR EN CALCAIRE TOTAL (SOL-CONSEIL)

CaCO <sub>3</sub> total (%)	Appréciation
0	non calcaire
1 à 2.9	traces de calcaire
3 à 10.9	peu calcaire
11 à 25.9	moyennement calcaire
26 à 39.9	calcaire
> 40	très calcaire

Pour les sols non calcaires, le pH peut être un bon indicateur de la nécessité de chauler lorsque ses valeurs sont extrêmes. Au-dessus de 6.5, le chaulage n'est en général pas nécessaire. En dessous de 5.5 (risques de toxicités et de lessivage des argiles), des chaulages de fond peuvent être réfléchis. Entre ces deux valeurs, les variations saisonnières peuvent être très importantes et modifier la décision d'une nécessité de chaulage. La question concernera donc d'avantage la CEC et son taux de saturation. La décision se fera suivant le Tableau 4. Si un chaulage est nécessaire, la quantité de chaux à apporter peut être déterminée à l'aide du Tableau 5. Pour les apports supérieurs à 20 dt/ha, il est recommandé de fractionner la quantité en 2-3 apports espacés de 2-4 ans.

TABLEAU 4 : INTERPRÉTATION DE LA CEC ET DU TAUX DE SATURATION DES CATIONS (COLLAUD ET AL., 1990)

Taux de saturation (%)	CEC (méq/100 g de terre)		
	0 – 12	12 – 20	> 20
75 – 100	Pas de chaulage	Pas de chaulage	Pas de chaulage
	- Fractionner la fumure	- Fractionner la fumure si des corrections importantes sont nécessaires	- Peut supporter des corrections de fumure importantes
60 – 75	Chaulage éventuel	Chaulage éventuel	Chaulage éventuel
	- Apporter P, K et Mg juste avant la culture	- Peut supporter des corrections de fumure importantes	- Peut supporter des corrections de fumure importantes
< 60	Faible chaulage nécessaire	Chaulage moyen nécessaire	Fort chaulage nécessaire
	- Apporter P, K, Mg et B juste avant la culture - Pulvériser du Mn sur feuillage	- Apporter P, K, Mg et B juste avant la culture - Pulvériser du Mn sur feuillage	- Apporter P, K, Mg et B juste avant la culture - Pulvériser du Mn sur feuillage

TABLEAU 5 : BESOINS EN CAO (DT/HA) SUR LES TERRES ASSOLÉES, SELON LA CEC ET SON TAUX DE SATURATION (PRIF 2017)

Taux de saturation des bases (%)	Apports de CaO (dt/ha)			
	Capacité d'échange cationique (méq/100 g de terre)			
	< 10	10 – 14.9	15 – 19.9	≥ 20
> 60	0	0	0	0
50-60	7.3	12.5	15.5	20.0
40-49	10.0	19.0	21.5	28.0
< 40	13.0	24.5	27.5	36.0

### 3. Les différents amendements calciques

Les engrais de ferme ont un effet chaulant non négligeable. Ils permettent de compenser une partie des pertes/exportations et complètent les apports par la roche mère (PRIF, 2017) :

- 1 tonne de fumier de bovin apporte 3 kg de CaO
- 1 tonne de fumier de poule apporte 94 kg de CaO
- 1 m<sup>3</sup> de lisier de porcs apporte 3 kg de CaO

Les amendements du commerce se différencient par la composition et la mouture des carbonates, qui vont directement influencer leur rapidité d'action (Tableau 6). La chaux éteinte et la chaux vive, souvent disponibles sous forme de poudres fines, agissent rapidement. Elles peuvent donc rapidement être utilisées ou lessivées. Ces produits peuvent avoir un effet négatif sur la vie biologique du sol car leur action rapide modifie trop vite le milieu pour que les organismes puissent s'adapter. Les produits à base de carbonates de calcium et plus grossiers agissent plus lentement. Les chaux carbonatées (forme CaCO<sub>3</sub>) conviennent particulièrement au chaulage d'entretien du fait de leur action lente. Les carbonates sont dissous en chaux active par l'activité biochimique du sol, l'influence sur les organismes du sol est donc plus douce.

Outre la composition, la finesse de mouture des amendements calciques influence leur efficacité.

- Une mouture fine possède une surface de particules plus importante qu'une mouture plus grossière, elle aura donc une vitesse de décomposition et donc d'action plus rapide. Elles ont un effet « azote » important (~15 unités) de par leur effet destructeur sur les microorganismes.
- Une mouture grossière aura une vitesse d'action plus lente, mais durera plus longtemps. En général les mélanges de moutures de grains de 0 à 4 mm de diamètre (« 0-4 ») sont les moins risquées, puisque qu'elles couvrent une large gamme d'action de rapide à lente. On peut ainsi espérer un équilibre plus durable et diminuer la fréquence des apports.
- Une mouture plus grossière (>5-10mm) est en principe à éviter (risques de blocages d'autres éléments).
- Les granulométries uniques (par exemple « 4 mm ») sont rarement intéressantes, car elles ne présentent qu'un seul type de vitesse d'action. Ce sont souvent les produits les plus simples et les plus naturels qui fonctionnent le mieux.

Les chaux dites « magnésiennes » sont délicates à employer car elles vont modifier l'équilibre du Ca et du Mg dans le sol. Dans la plupart des sols, le magnésium ne doit représenter que 10 à 20 % de la somme du calcium et du magnésium. En dessous, il y a un risque de carence pour les plantes et les microorganismes. Au-dessus, la structure du sol est fragilisée avec une plus forte sensibilité à la battance. Pour les organismes vivants, l'excès de magnésium perturbe l'absorption et l'utilisation du calcium. Il est donc plus facile de piloter le calcium avec la chaux et le magnésium avec des sulfates, plutôt que d'utiliser un produit contenant les deux mais pour lesquels on ne peut pas jouer sur les équilibres (Hérody, 2015).

TABLEAU 6 : PROPRIÉTÉS DES DIFFÉRENTS AMENDEMENTS CALCIFIQUES (PRIF 2017)

Nom commercial	Teneur en chaux			Teneurs en éléments annexes	Action
	Formule chimique	Teneur (%)	Effet neutralisant (équivalent CaO, %)		
Chaux Calcaire moulu Carbonate de calcium	CaCO <sub>3</sub>	> 90	50		Lente
Chaux d'algues marines	CaCO <sub>3</sub> MgCO <sub>3</sub>	75 – 80 10	50	2 – 3% Mg	Lente
Dolomie	CaCO <sub>3</sub> MgCO <sub>3</sub>	50 – 60 40	45-50	12% Mg	Lente
Chaux éteinte	Ca(OH) <sub>2</sub>		55		Rapide
Chaux vive	CaO	75 – 90	75 – 90		Rapide
Chaux vive – chaux magnésienne	CaO MgO	60 25	95	15% Mg	Rapide
Chaux d'Aarberg (écumes de sucreries)	CaCO <sub>3</sub>	54	30	30% H <sub>2</sub> O ; 1.1% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ; 0.6% Mg ; 0.3% N	Moyenne
Engrais calciques, sous-produit de l'extraction de gravier	CaCO <sub>3</sub>	Variable selon provenance et charge		Teneur en éléments nutritifs faible	Lente

La dose à apporter de l'amendement choisi peut être calculée selon la formule suivante :

$$\frac{\text{Besoins en CaO (dt/ha)}}{\text{Effet neutralisant (équivalent CaO, \%)}} = \text{Dose d'amendement(dt/ha)}$$

L'effet neutralisant des amendements, exprimé en équivalent CaO, peut être calculé en multipliant la teneur en élément en % par les facteurs de conversion donnés dans le Tableau 7.

TABLEAU 7 : FACTEURS DE CONVERSION PERMETTANT DE CALCULER LA VALEUR NEUTRALISANTE DES AMENDEMENTS CALCIQUES

Ca	x 1.399	= CaO
CaCO <sub>3</sub>	x 0.560	= CaO
Ca(OH) <sub>2</sub>	x 0.757	= CaO
MgO	x 1.391	= CaO
MgCO <sub>3</sub>	x 0.665	= CaO

#### 4. Quel est l'effet du chaulage sur la CEC et le taux de saturation ?

Les différentes formes d'amendements calciques ou magnésiens subissent une transformation dans le sol pour atteindre leur forme oxydée et libèrent du CO<sub>2</sub> ou des H<sup>+</sup> lors de cette transformation. L'oxyde de calcium (CaO) ou l'oxyde de magnésium (MgO) dans le sol ont pour effet de libérer les ions H<sup>+</sup> du complexe argilo humique pour former de l'eau (H<sub>2</sub>O) et d'occuper ensuite les sites négatifs ainsi libérées (les H<sup>+</sup> sont remplacés par les cations Ca<sup>2+</sup> ou Mg<sup>2+</sup>). La CEC n'est pas modifiée, mais le taux de saturation augmente.

#### 5. En conclusion

Le chaulage est une pratique qui peut être essentielle pour optimiser le fonctionnement du sol, et donc garantir une production durable. Ce n'est toutefois pas une pratique à envisager systématiquement. Le chaulage représente un investissement et des risques, il faut se poser quelques questions avant de chauler :

- Mon sol est-il calcaire ? Si oui, on peut attendre quelques générations avant de se poser la question du chaulage
- Quel est l'état organique de mon sol ? Si mon sol est pauvre en MO, chauler n'aura pas l'effet désiré. Dans pareil cas, le pH sera modifié à court terme, au détriment de la vie du sol. En revanche, améliorer l'état organique de son sol et stimuler sa vie microbienne sont les conditions nécessaires pour une efficacité maximale de la chaux.
- Le pH, varie au court de l'année, c'est un indicateur et non un objectif en soi. En cas de pH très bas, il faut se poser la question d'une origine naturelle ou non. S'il est naturellement acide, il n'est pas possible de le corriger (10'000 ans d'évolution). En revanche, si le sol s'est acidifié sous l'effet des pratiques agricoles, il faut envisager un chaulage sur la base de la CEC et du taux de saturation en bases
- Il faut optimiser le pilotage des bases avec les chaux en termes de quantité et de fréquence en fonction des objectifs définis par ces diagnostics. Les effets ne sont souvent pas perceptibles avant un minimum de 5 années, mais ils sont souvent bien réels (vie du sol, diminution drastique de l'érosion, etc.).

## Bibliographie

Collaud G., Ryser J.-P., Schwarz J.-J., 1990. Capacité d'échange des cations. Revue suisse Agric. 22, 285-289.

Hérody Y., 2015. Le chaulage – l'état calcique des sols cultivés. BRDA Editions, Collection « les fondamentaux de l'agriculture », 90 p.

Sinaj S., Richner W., 2017. Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF 2017). Recherche Agronomique Suisse 8, Publication spéciale, 276 p.

Wending M.<sup>1</sup>, Carrard E.<sup>2</sup>, Schaffner L.<sup>3</sup>, Füllemann F.<sup>4</sup> et Charles R.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> FiBL Avenue des Jordils 3, 1004 Lausanne

<sup>2</sup> ProConseil Avenue des Sports 48, 1400 Yverdon-les-Bains

<sup>3</sup> Mandaterre Avenue des Sports 48, 1400 Yverdon-les-Bains

<sup>4</sup> Direction générale de l'environnement (DGE), Rue du Valentin 10, 1014 Lausanne

Mars 2020

Projet soutenu par la Direction générale de l'agriculture de la viticulture et des affaires vétérinaires (DGAV) et la Direction générale de l'environnement (DGE)