

## Etude de l'importance des paramètres sol permettant d'évaluer l'aptitude agricole d'un site



Marina Wendling, Nathaniel Schmid et Raphaël Charles

2022

**FiBL**

---

Mentions légales

**Auteur** : Marina Wendling, Nathaniel Schmid et Raphaël Charles

**Direction de projet** : Marina Wendling

**Année de publication** : 2022

**Mandataire** : Centre de compétences sur les sols (CCSols), [ccsols.ch](http://ccsols.ch).

**Mode de citation recommandé** : Wendling, M., Schmid, N. et Charles, R. (2022) : Etude de l'importance des paramètres sol permettant d'évaluer l'aptitude agricole d'un site. Disponible sous [www.ccsols.ch](http://www.ccsols.ch)

**Remarque** : Ce rapport a été rédigé à la demande du CCSols. Les auteurs sont responsables du contenu.

# Etude de l'importance des paramètres sol permettant d'évaluer l'aptitude agricole d'un site

La classe d'aptitude (CA) est une méthode de référence qui définit la qualité d'un sol pour l'utilisation agricole. Elle se base sur trois facteurs : le climat, le sol et la topographie. La méthode ayant été décrite en 1997 (Brunner et al., 1997), il apparaît important d'étudier si l'importance des facteurs utilisés pour définir l'aptitude agricole d'un site a évolué et si certains facteurs essentiels font défaut. Cette étude se concentre sur les facteurs sol mais donne également des indications sur un certain nombre de facteurs climatiques et de terrain. Elle a pour objectif de répondre aux questions suivantes :

1. Quelle est l'importance des variables d'entrée de la méthode CA pour déterminer l'aptitude à l'utilisation agricole d'un site selon les pratiques agricoles actuelles ?
2. L'importance de ces variables d'entrée a-t-elle changé par rapport à la période précédente considérée dans la description de la CA ?
3. Quels changements peut-on s'attendre à l'avenir en ce qui concerne l'importance des variables d'entrée ?
4. Quels paramètres ne sont pas actuellement pris en compte dans la CA mais seraient également pertinentes pour une évaluation de l'aptitude des exploitations agricoles à l'avenir ?

## 1 Facteurs sol

### 1.1 Importance agronomique des variables utilisées pour déterminer la classe d'aptitude d'un site

Dans la méthode décrite par Brunner et al. (1997), l'aptitude d'un site est déterminée en fonction de différents paramètres du sol : le régime hydrique (hydromorphie), la composition de la couche supérieure du sol (pierrosité, texture et teneur en matière organique) ainsi que la topographie. Ces paramètres ont une influence sur différentes propriétés du sol déterminantes pour son aptitude à la production agricole (Fig. 1). Ils contribuent notamment à l'enracinement des plantes et à leur alimentation en eau et en nutriments. Une description détaillée est proposée dans les chapitres suivants.

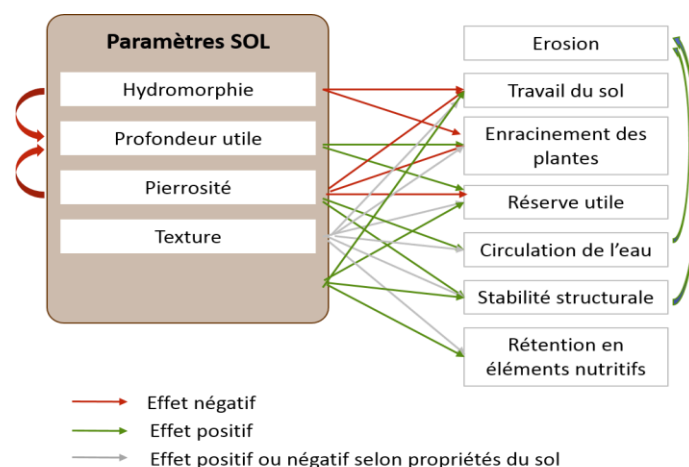


Figure 1. Influence des paramètres du sol utilisés pour la définition des CA sur certaines propriétés du sol ayant un rôle majeur pour la production agricole.

### 1.1.1 Le régime hydrique : hydromorphie

L'hydromorphie apparaît lorsque le sol est régulièrement saturé en eau. Dans des conditions asphyxiantes, l'enracinement ne peut pas se faire. Elle peut être d'origine exogène au profil et provenir de l'eau de fond ou d'une situation en pente, ou à contrario d'origine intrinsèque, générée par la rétention de l'eau de pluie due à une perméabilité ralentie. Cette rétention peut être géologique ou être le résultat de la compaction du sol.

Les sols à tendance hydromorphe sont particulièrement problématiques lorsque les précipitations sont importantes en hiver et au début du printemps. Durant cette période, l'excès d'humidité peut entraîner une asphyxie des cultures en place ainsi que de la vie du sol. L'hydromorphie est également particulièrement problématique pour le travail du sol, limitant fortement la portance du sol. Selon les conditions pédoclimatiques, l'hydromorphie peut également avoir une influence positive. Elle peut entraîner un ralentissement de la circulation de l'eau qui peut se révéler bénéfique en cas de sécheresse.

### 1.1.2 La profondeur utile

La profondeur utile correspond à la profondeur exploitable par les racines. Elle joue un rôle essentiel pour l'aptitude d'un sol à l'utilisation agricole puisqu'elle détermine le volume de terre disponible pour l'enracinement des cultures et surtout la quantité d'eau disponible pour les plantes (réserve utile). Par extension, elle donne aussi une indication sur la capacité de stockage de nutriments. Plus la profondeur utile est grande, plus la réserve utile en eau est importante. Par exemple, en sol limon sablo argileux, 30 cm de profondeur d'enracinement supplémentaire permet d'augmenter la réserve utile de 45 mm (gissol.fr). Le tableau 1 donne une estimation de la réserve utile en fonction de la profondeur utile pour un sol moyennement lourd. On peut ainsi calculer que lors d'une période sans précipitations, un sol moyennement lourd avec une profondeur utile de 70 cm permet de repousser le stress hydrique de 10 jours par rapport à un sol ayant une profondeur utile de 30 cm (calculé pour une évapotranspiration moyenne de 4 mm/jour).

Table 1. Profondeur utile et estimation de la réserve utile (source : Brunner et al., 1997)

Profondeur utile				Capacité de rétention d'eau facilement disponible pour un sol moyennement lourd (10 - 30 % argile)			
Code	Signification	Abréviation	cm	Code	Signification	Abréviation	mm ou litres / m <sup>2</sup>
0	Extrêmement profond	ep	> 150	0	Extrêmement grand	eg	> 150
1	Très profond	tp	100 - 150	1	Très grand	tg	100 - 150
2	Profond	p	70 - 100	2	Grand	g	70 - 100
3	Modérément profond	mp	50 - 70	3	Moyenne	m	50 - 70
4	Assez superficiel	as	30 - 50	4	Petite	p	30 - 50
5	Superficiel	s	10 - 30	5	Très petite	tp	10 - 30
6	Très superficiel	ts	< 10	6	Extrêmement petite	ep	- 10

### 1.1.3 La composition de la couche arable

#### a. Pierrosité

La pierrosité correspond à la quantité d'éléments grossiers dans le sol. Une présence importante de ces éléments peut avoir des effets bénéfiques sur le sol et les plantes cultivées. Elle améliore notamment la perméabilité et le drainage de l'eau, limite le risque de tassement, permet de stocker de la chaleur et facilite un réchauffement du sol plus rapide au printemps. Une charge importante en cailloux représente cependant un obstacle à la mécanisation et une usure conséquente des machines. Dans les zones très caillouteuses comme dans le Jura, certains agriculteurs ont recours au broyage mécanique des cailloux, mais cette pratique est très coûteuse et reste peu répandue, voire est interdite (pâturage). L'objectif est plutôt d'adapter les techniques de cultures aux conditions et d'éviter au maximum de faire remonter les cailloux. Pour cela, les agriculteurs choisissent le semis direct ou le travail superficiel plutôt que le labour profond. On préfère également les socs à lame et les outils à dents verticales (sauf pour l'enfouissement des pailles où les outils à disque semblent préférables). Dans des conditions très caillouteuses, l'implantation de cultures sarclées est difficile, chaque passage faisant remonter les cailloux à la surface entravant ainsi une bonne récolte. Dans ces conditions, les cultures fourragères combinées avec un passage de rouleau pour aplanir la surface du sol sont souvent privilégiées.

La pierrosité a également un impact direct (lésions, obstacle au développement...) ou indirect (modification du contexte du sol) sur les racines. Les légumes tige, comme l'asperge, les bulbes, les légumes racines et les tubercules sont les plus sensibles. Les cailloux peuvent également représenter un risque de non contact de la graine avec la terre fine et pénaliser le développement des organes fragiles comme les coléoptiles et les racines séminales des céréales. "Un autre effet évident, mais plus difficile à appréhender, est la consommation supplémentaire d'énergie par le végétal pour le développement des racines dans un sol comportant beaucoup d'obstacles physiques, au détriment de l'axe végétatif et de la production. Des racines plus « torturées » sont également moins performantes." (wiki.aurea.eu) Une analogie peut être faite entre les sols compactés et très pierreux en terme de développement racinaire des espèces. Dans des conditions contraignant le bon enracinement des cultures, l'étude de Colombi et Walter (2016). a montré que le développement du système racinaire du triticale et la profondeur d'enracinement sont considérablement réduits, avec une réduction de la ramification des racines et une augmentation de leur diamètre. Pour le soja en revanche, les modifications architecturales et anatomiques observées durant le développement initial, ne sont plus visibles ensuite. Ce résultat semble indiquer que certaines espèces seraient mieux adaptées à ces conditions.

#### b. Texture

La texture ainsi que la teneur en matière organique définit :

- la disponibilité en éléments nutritifs
- la sensibilité au tassement
- la stabilité de la structure (et par là le risque d'érosion, de ruissellement et de battance)
- la perméabilité à l'eau
- la réaction au travail du sol" (Sinaj et Richner, 2017)

La table 2 donne les propriétés du sol en fonction de sa teneur en argile.

Table 2. Relation entre classe de teneur en argile et propriétés des sols (source : Sinaj et Richner, 2017)

Propriétés	Valeurs de seuil pour l'interprétation des analyses chimiques				
	Sols sableux	Sols sableux-limoneux	Sols limoneux	Sols argilo-limoneux	Sols argileux
	< 10 % d'argile	10–19,9 % d'argile	20–29,9 % d'argile	30–39,9 % d'argile	≥ 40 % d'argile
Perméabilité à l'eau	très bonne	bonne	bonne	moyenne	faible
Capacité hydrique	faible	moyenne	élevée	élevée	très élevée
Aération	très élevée	bonne	bonne	moyenne	faible
Capacité de rétention pour les éléments nutritifs	faible	faible à moyenne	moyenne	bonne	très bonne
Travail du sol	facile	facile	moyen	moyen à difficile	difficile
Pénétration des racines	très bonne	très bonne	bonne	médiocre	faible

La texture du sol influence également directement la réserve utile. Plus la texture est fine, plus la réserve utile du sol est importante. Les fiches techniques donnent les gammes suivantes pour un sol non caillouteux (Gendry, 2018) :

- de 0,9 à 1,2 mm/cm pour une texture grossière (sable)
- de 1,3 à 1,6 mm/cm pour une texture moyenne
- de 1,8 à 2,0 mm/cm pour une texture fine (argile, argilo-limoneux, argilo-sableux)

Une appréciation plus fine de la réserve utile selon la classe texturale peut être faite sur la base de la figure 2.

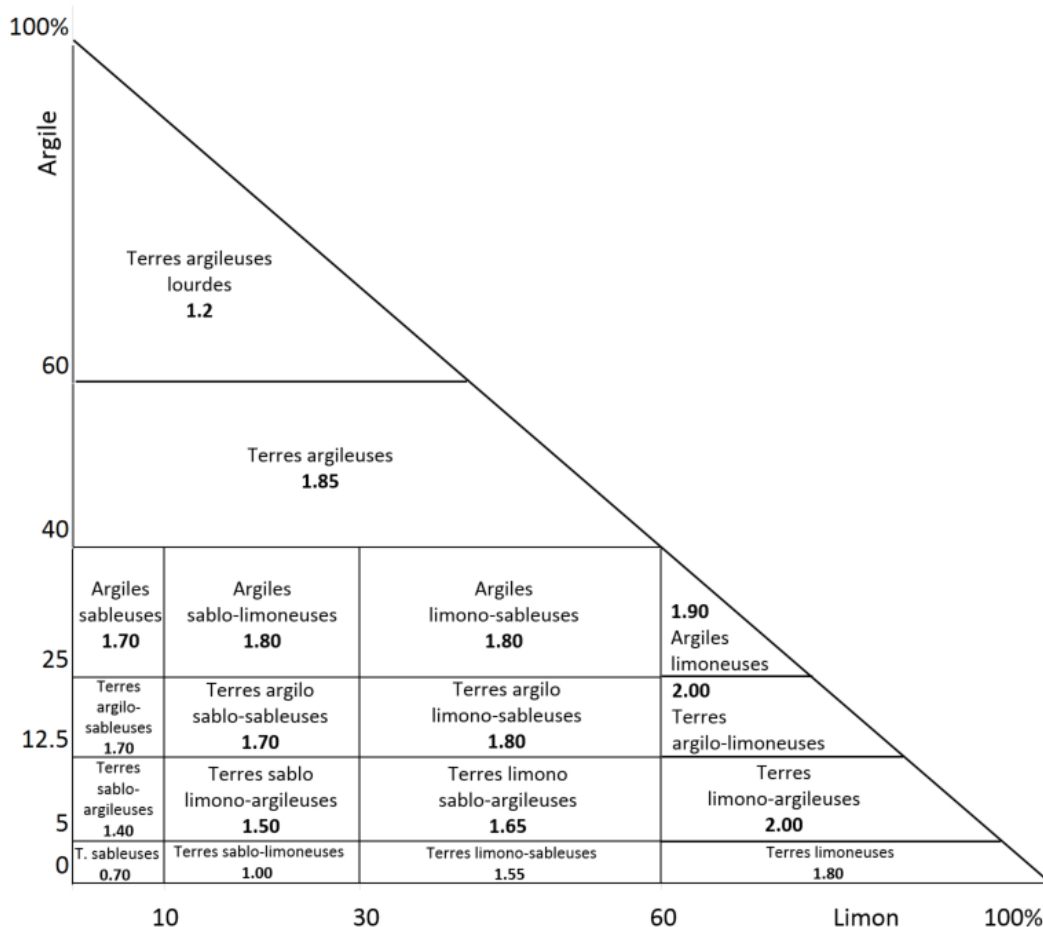


Figure 2. Réserve utile (RU) du sol selon sa texture. Les valeurs indiquées sont exprimées en mm de RU par cm de sol pour la terre fine (adaptée de Poudou, Chambre d'agriculture Ariège)



### c. Teneur en matière organique

La matière organique (MO) joue un rôle essentiel dans le sol et contribue à ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. Par la formation de complexes argilo-humique, avec la contribution des microorganismes du sol, elle influence directement la structure du sol et la stabilité de cette dernière, c'est-à-dire la capacité du sol à résister à des dégradations ou à limiter leur impact. De récents travaux mettent en évidence que le rapport matière organique/argile est corrélé à la vulnérabilité de la structure du sol (Johannes et al., 2017). Ainsi il est admis qu'il faut atteindre un rapport MO/argile de 17% (0.17/1) pour une bonne qualité structurale. Par exemple, pour un sol avec 10 % d'argile, il faut disposer de 1.7 % de MO. En dessous de cette valeur, le sol est vulnérable. Deux autres seuils ont été fixés à 12% pour une qualité structurale très insuffisante et à 24% pour une très bonne qualité. En améliorant la stabilité structurale, la MO permet de réduire le risque de tassement, d'érosion et de battance. Par le biais de son rôle dans la préservation de la structure du sol, elle assure une bonne infiltration de l'eau et améliore la capacité de rétention en eau. La MO contribue aussi directement à la réserve utile du sol puisqu'elle est capable de retenir jusqu'à 3 à 5 fois son poids en eau. Une augmentation de 1% de MO permet au sol de stocker 40 mm de pluie sous une forme disponible pour les plantes. Cette contribution est plus importante dans les sols à texture grossière que dans les sols à texture fine.

La MO assure le stockage d'éléments nutritifs pour les cultures qui sont rendus disponibles grâce à la minéralisation. Pour assurer la fertilité du sol à long terme, il s'agit de faire des apports réguliers d'amendements organiques et d'éviter les pratiques culturales intensives (labour profond par exemple) qui pourraient entraîner une forte minéralisation.

La MO joue également un rôle central dans la capacité d'échange cationique (CEC) du sol grâce à sa charge négative. La MO est capable de retenir près de 200  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  contre environ 30  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  pour une argile de type illite (Marsden, 2014). Elle a donc une forte influence sur la capacité de ce sol à retenir et restituer les cations échangeables comme le potassium et le magnésium et à les protéger de la lixiviation.

Enfin, la MO améliore l'activité biologique des sols puisqu'elle constitue le substrat de base pour de nombreux organismes du sol, y compris les adventices et les plantes cultivées.

#### 1.1.4 La configuration du terrain : la pente

La pente est un obstacle majeur à la mécanisation. L'annexe 5 du manuel de cartographie établissait les relations entre les valeurs de pente, les possibilités d'utilisation de machines et l'aptitude à l'exploitation (Fig. 3 ; Brunner et al., 1997). Ce document reste toujours valable aujourd'hui. Dans les zones de montagne, le développement de machines autonomes a permis de mécaniser des travaux autrefois manuels, en particulier pour toute la gestion des fourragères.

Pour les zones de grandes cultures en pente, le défi reste la mécanisation. En effet, la majorité des machines sont développées pour des conditions de faible pente. Une partie des machines de désherbage mécanique en particulier ne sont pas adaptées à la pente. En effet, avec les machines actuelles, il n'est possible d'intervenir que lorsque les conditions sont vraiment optimales. Les fenêtres d'actions sont donc très réduites. Le travail de sol est possible en privilégiant des charrues déchaumeuses plutôt que des scalpeurs et en travaillant dans le sens des courbes de niveaux avec un retournement de la terre contre le haut de la parcelle. Toutefois, les cultures nécessitant un grand nombre d'interventions sont à proscrire. Chaque passage mécanique faisant remonter les cailloux, la récolte peut s'avérer difficile.

<b>Pente</b>	<b>0 à 10%</b>	<b>10 à 15%</b>	<b>15 à 25%</b>	<b>25 à 35%</b>
<b>Grandes cultures</b>				
- Cultures sarclées	sans restriction notable	plus difficile	beaucoup plus difficile	
	récolteuse intégrale		récolteuse tractée	
- Cultures céréalières	sans restriction notable	plus difficile	nettement plus difficile	très difficile
	moissonneuse-batteuse			
			moissonneuse-batteuse type coteau	
- Production fourragère	sans restriction notable	sans restriction notable	plus difficile	beaucoup plus difficile
	tracteur normal avec autochargeuse			tracteur à quatre roues motrices avec autochargeuse
<b>Prairie naturelle jusqu'à 35 % de pente</b>				
- Prairie de fauche	sans restriction notable	sans restriction notable	plus difficile	nettement plus difficile
	tracteur normal avec autochargeuse			tracteur à quatre roues motrices avec autochargeuse faucheuse à deux essieux
- Pâturage	pâturage à gros bétail (vaches)	pâturage à gros bétail (vaches)	pâturage à gros bétail (vaches)	pâturage à gros bétail (vaches)
<b>Pente</b>	<b>35 à 50%</b>	<b>50 à 60%</b>	<b>60 à 75%</b>	<b>&gt;75%</b>
<b>Prairie naturelle à partir de 35 % de pente</b>				
- Prairie de fauche	beaucoup plus difficile	beaucoup plus difficile	très difficile	extrêmement difficile
	Transporteur		motofaucheuse pour terrain montagneux	
	faucheuse à deux essieux			
- Pâturage	pâturage à gros bétail et à jeune bétail (bovins)	pâturage à jeune bétail (bovins)	pâturage à menu bétail (moutons, chèvres)	pâturage à menu bétail (moutons, chèvres)

Figure 3. Relations entre les valeurs de pente, les possibilités d'utilisation de machines et l'aptitude à l'exploitation (Source : Brunner et al., 1997)

La longueur de la pente et son inclinaison sont également des paramètres importants qui influencent le risque d'érosion. Dans le cas de pentes faiblement inclinées, l'érosion est surtout due à l'énergie cinétique de la pluie, mais aussi expliquée par une stabilité structurale dégradée des sols. Au-delà d'une pente supérieure à environ 2%, le risque d'érosion augmente fortement en raison de la formation de rigoles (Morschel and Fox, 2004). Agroscope a développé un outil en collaboration avec l'Institut géographique de l'Université de Berne permettant de calculer le risque d'érosion effectif pour chaque parcelle. Le calcul de ce risque effectif est basé sur le risque d'érosion potentiel de la carte des risques d'érosion de la Suisse (ERK2) combiné au facteur de rotation des cultures et d'exploitation des sols (facteur CP). Le risque potentiel est évalué en fonction de paramètres qui dépendent du site (l'érosivité des précipitations, l'érodibilité du sol ainsi que longueur de pente et déclivité de la parcelle). Ce risque peut être amoindri ou aggravé selon les pratiques de l'agriculteur, à savoir les pratiques qui influencent la couverture du sol ainsi que le sens du travail du sol.



## 1.2 Evolution de l'importance de ces paramètres

La figure 5 représente l'évolution de l'importance des facteurs utilisés pour définir l'aptitude d'un site entre 1997 et aujourd'hui.

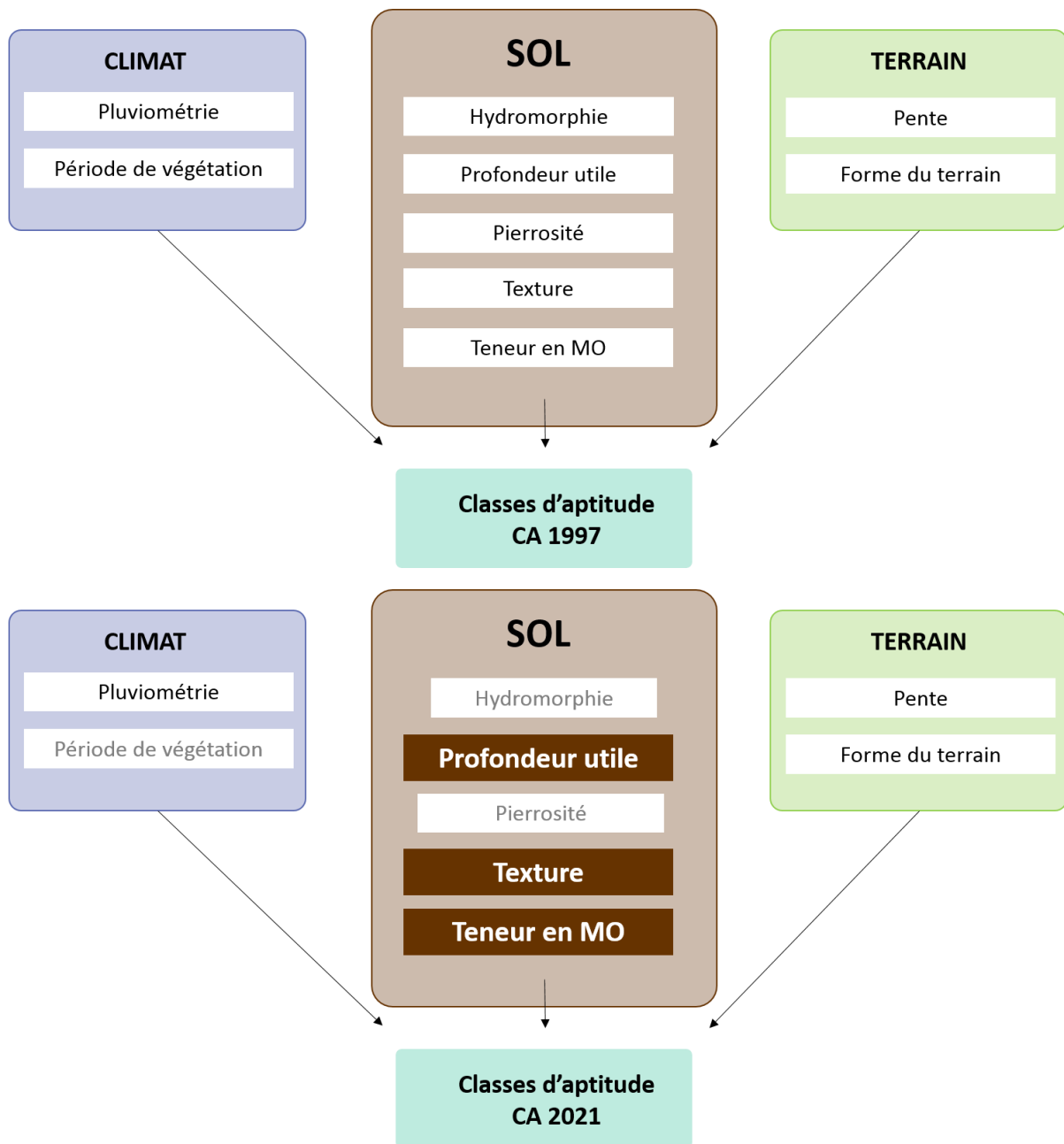


Figure 4. Evolution de l'importance des paramètres servant à la définition de l'aptitude d'un site entre 1997 et 2021. Les cases colorées ont gagnées en importance alors que celles grisées en ont légèrement perdu.

La **profondeur utile**, la **texture** et la **teneur en matière organique** sont des paramètres essentiels puisqu'ils contribuent à la réserve utile du sol, à l'absorption et au stockage de l'eau de pluie, à l'alimentation en eau des cultures. Dans un contexte de changement climatique avec de longues périodes sans précipitations ou des événements pluvieux extrêmes, ces paramètres ont gagné en importance. Ils permettent de réduire les risques d'inondation et les stress hydriques. Ils sécurisent ainsi les rendements, en particulier en périodes de sécheresse. La démonstration du gain en importance de ces paramètres est particulièrement observée dans les zones non irrigables avec des sols superficiels et/ou légers. En effet, ce type de parcelles ne se prête plus à certaines cultures

exigeantes en termes de régulation du régime hydrique comme les cultures estivales qui ont des besoins élevés en eau. De même, dans les sols dégradés et tassés qui sont régulièrement inondés, et certaines espèces cultivées (betterave, pois) ou encore les cultures maraichères, qui supportent mal les excès en eau, ne sont plus adaptées. L'importance de la teneur en MO sera d'autant plus grande dans un contexte de changement climatique puisque contrairement à la texture, l'agriculteur peut améliorer la teneur en MO par ses pratiques agricoles et ainsi améliorer la réserve utile.

Les sols à tendance **hydromorphe** sont particulièrement problématiques lorsque les précipitations sont importantes en hiver et au début du printemps. Durant cette période, l'excès d'humidité peut entraîner une asphyxie des cultures en place. Avec les changements climatiques, ces sols devraient moins souffrir d'excès d'humidité. L'hydromorphie peut même se révéler bénéfique dans certaines zones, notamment en cas de sécheresse puisqu'elle permet une meilleure rétention en eau ou un apport d'eau par le fond du profil.

La **pierrosité** est un obstacle majeur à la mécanisation. Pour la pomme de terre toutefois, cette limite a été levée par un développement technique, le tamisage (fig. 4), qui a permis une extension de la zone de culture de la pomme de terre. Cette technique consiste à enlever les pierres et mottes d'un diamètre supérieur à 30mm des futures lignes de plantation et à les placer entre les buttes. Cette technique permet de créer des conditions de croissance idéales et d'amélioration de la forme des pommes de terre. La récolte est également facilitée. Après récolte, les andains de pierres et cailloux sont ré-étalés par deux passages croisés d'outil à dents pour assurer une croissance régulière des cultures suivantes. A l'heure actuelle, le tamisage est quasiment devenu systématique avant l'implantation de la pomme de terre. Elle peut toutefois représenter un risque pour la structure du sol. Un affinage de la structure accroît la sensibilité du sol à l'érosion et au ruissellement.



Figure 5. Tamisage du sol avant implantation de la pomme de terre (source : Netagco.ch)

La **pente** est un frein à la mécanisation et limite ainsi la mise en culture de certains sites. Malgré des développements techniques, il n'est pas recommandé d'étendre les zones en grandes cultures en raison d'un grand risque d'érosion. Dans les zones à fortes pentes où seuls des herbages sont possibles, la mécanisation (robot ou motofaucheuse) rend l'exploitation de ces zones toujours et encore viable. Elle a en effet permis un gain de temps important par rapport à la récolte manuelle pratiquée auparavant. Ces zones étant déjà exploitées, la mécanisation n'a pas permis un gain de surfaces mais a certainement limiter la déprise en montagne.

### 1.3 Adaptations agronomiques

Pour pallier au déficit hydrique du printemps et de l'été, de nombreux éleveurs privilégient les herbages ou la luzerne ou se tournent vers des cultures fourragères moins exigeantes en eau telles que le sorgho. Le sorgho présente un enracinement plus profond que le maïs et un feuillage moins important, limitant les pertes en eau. Il est aussi plus tolérant aux températures élevées mais présente une valeur alimentaire moindre (Chambre d'Agriculture Saône et Loire, 2020). Le tournesol, le millet et la betterave sucrière sont également des cultures à faibles besoins en eau, capables de s'adapter à la sécheresse. En outre, pour limiter les pertes de récoltes liées au stress hydrique, certains agriculteurs privilégient les associations d'espèces ou de variétés, permettant ainsi une meilleure valorisation des ressources.

La sélection variétale est également un levier d'action permettant de réduire les effets négatifs du stress hydrique. On retrouve par exemple, sur la liste recommandée des céréales, la précocité à l'épiaison (Schaad et al., 2020). En choisissant des variétés plus précoces, le risque de stress hydrique favorisant notamment l'échaudage est moindre.

### 1.4 Paramètres sol qui ne sont pas pris en compte

Dans la méthode actuelle, la structure du sol n'est pas prise en compte pour définir l'aptitude d'un site. Une bonne qualité structurale est pourtant essentielle pour une bonne implantation des cultures et leur nutrition. La compaction, qui est une augmentation de la densité du sol, peut avoir des conséquences dramatiques sur le fonctionnement du sol et donc sur les cultures. Elle réduit sa porosité et sa profondeur utile et diminue ainsi la réserve en eau du sol disponible pour les cultures. En limitant la circulation de l'eau et les échanges gazeux, elle perturbe l'enracinement des plantes et la rhizodéposition en profondeur utile à la régénération de la matière organique et des fonctions vitales dans les horizons profonds du sol. La compaction accroît également le risque de ruissellement et d'érosion. La compaction est un problème d'autant plus important que souvent, c'est un phénomène difficilement perceptible. En effet, les agriculteurs pensent résoudre le problème par le travail du sol mais les effets sur le sous-sol sont irréversibles.

Le risque de compaction est très dépendant de l'humidité et de la texture du sol. En conditions humides, un sol argileux est plus sensible à la compaction qu'un sol sableux, alors qu'en conditions sèches, c'est l'inverse. Le risque est également réduit par la teneur en MO du sol et par sa pierrosité.

Ces dernières années, le risque de compaction s'est accru du fait de l'augmentation du poids des machines, mais aussi de périodes particulièrement pluvieuses. De plus, les agriculteurs font de plus en plus appel à des entrepreneurs qui préfèrent des machines plus grandes et plus lourdes pour améliorer les débits de chantier et qui ne disposent pas de la flexibilité en temps voulue pour tenir compte de l'état du sol lors de leurs interventions.

## 2 Autres paramètres non pris en compte dans la méthode actuelle

### 2.1 Climat

L'aptitude d'un sol est tout d'abord déterminée en fonction de la zone climatique définie en fonction de la durée de la période de végétation ainsi que la répartition des températures et des précipitations. D'autres facteurs climatiques sont toutefois importants pour définir l'aptitude à la production agricole.

### 2.1.1 Gel et brusque baisse de températures

L'intensité, la fréquence et les périodes de gel sont des paramètres clés qui déterminent l'adaptation de certaines cultures à un site donné. Le gel influence le développement des cultures d'automne avant l'hiver, mais peut également limiter la mise en place de certaines cultures de printemps très sensibles aux températures négatives. Il réduit également la pression de certains ravageurs. Les dégâts liés au gel sur les cultures peuvent se révéler très importants allant jusqu'à la destruction totale.

L'évolution des périodes de gel a une influence directe sur les cultures d'automne, notamment le pois qui est l'une des espèces les sensibles. Une diminution des gels couplée à des semis tardifs à l'automne ont permis une extension de sa zone de culture. De nouvelles variétés de pois d'hiver réactifs à la photopériode pourraient être proposées au cours des prochaines années aux agriculteurs. Ces pois permettraient être semés plus tôt à l'automne, dans la même période que le blé, sans courir le risque que l'initiation florale ait lieu trop tôt, ce qui protègerait les bourgeons floraux des gels tardifs de fin d'hiver (Lecomte et al. 2015).

L'allongement de la période de croissance avant l'hiver, dû à des températures plus clémentes, a aussi des conséquences sur la résistance des cultures d'automne au gel. Pour le colza par exemple, des automnes doux et humides, propices à une pousse rapide des colzas dès le semis peuvent conduire à un allongement trop rapide des tiges. Ce phénomène appelé élongation automnale accroît la sensibilité du colza au gel et à la neige. Cette sensibilité est d'autant plus importante en cas de changement brusque de températures (Pellet et al., 2002). Dans ce cas les plantes ne peuvent pas passer par une phase d'endurcissement qui permet une bonne résistance au gel. Même si le « Le critère 'élongation automnale' est depuis longtemps pris en compte dans les programmes de sélection variétale du colza, le climat reste un facteur déterminant de l'intensité de cette élongation (Nicolas, 2019).

Enfin, l'absence de gel peut avoir des conséquences négatives en termes de contrôle naturel de certains ravageurs, comme les limaces, les pucerons ou les altises ou de régulation de certaines adventices. Un comptage des limaces a par exemple été effectué en absence de travail du sol dans l'essai Oberacker à l'Inforama Rütli, Zollikofen (BE) durant trois années consécutives (Burkhalter et al., 2010). Il a été montré qu'un hiver caractérisé par un grand nombre de jours de gel (2009) permet de réduire fortement les populations de limaces contrairement à un hiver doux, comptant peu de jours de gel (2007) (Fig. 6).

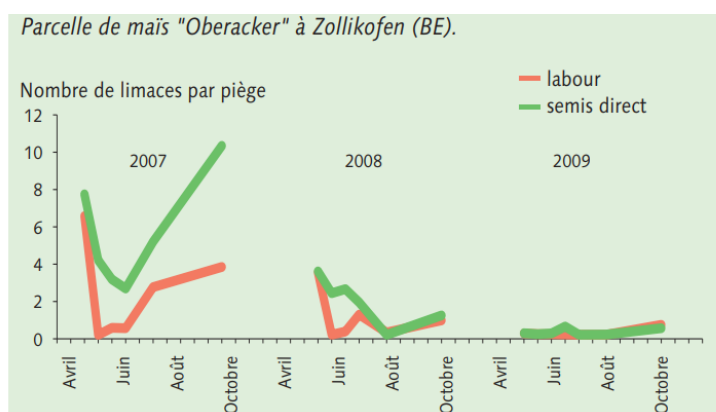


Figure 6. Nombre de limaces dans les systèmes «labour» et «semis direct» de l'essai Oberacker (source : Burkhalter et al. 2010)

Pour compléter l'évaluation du risque du gel sur les cultures, il est important d'évaluer l'humidité du sol qui est un facteur aggravant. L'enneigement doit également être pris en compte car la neige exerce un rôle protecteur des cultures. Une étude canadienne a évalué la température du sol sous différentes couches de neige (Fig. 7). Par exemple, quand la météorologie indique  $-10^{\circ}\text{C}$ , la température sous une couche de 5 cm de neige est de  $-5^{\circ}\text{C}$ . L'absence de cette couverture en altitude pourrait conduire à exposer davantage la végétation au gel.

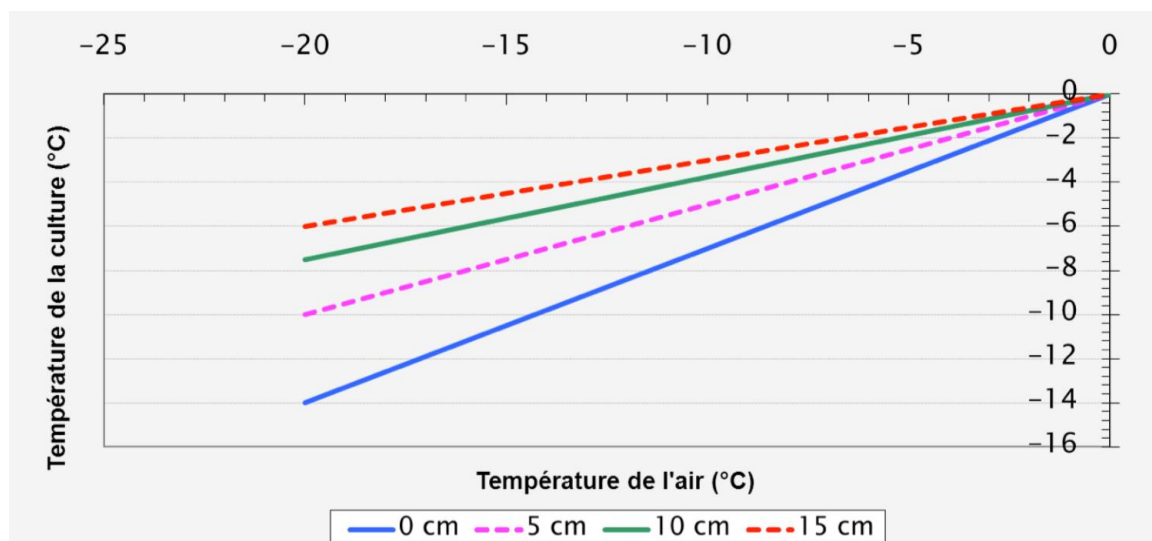


Figure 7. Correspondance entre la température de l'air et celle de la plante en fonction de 3 hauteurs de neige : 5, 10 et 15 cm (source Arvalis)

### 2.1.2 Hausse des températures

Outre l'apparition du gel, le choix cultural est dépendant de l'évolution des températures tout au long de l'année. L'augmentation des températures printanières sera bénéfique à l'implantation de cultures de printemps exigeantes en température comme le soja pour lesquelles une extension de la zone de culture est possible. Actuellement déjà, on observe un développement des cultures de maïs d'ensilage, pommes de terre, lupin ou luzerne en zone de collines voire en zone de montagne 1. En revanche, les températures estivales élevées sont très pénalisantes, en particulier au moment du remplissage du grain. Ce phénomène appelé "échaudage thermique" se manifeste à partir de  $25^{\circ}\text{C}$  et est fortement accentué par le cumul d'autres stress, le stress hydrique par exemple. Les jours échaudants sont d'autant plus pénalisants en sols superficiels et en cas de pluviométrie déficitaire. Les conséquences de l'échaudage sur le rendement peuvent être quantifiées. Pour le blé par exemple, on estime la perte à 1.5 dt/jour échaudant.

Il est également admis que la hausse des températures est bénéfique aux insectes ravageurs, avec des attaques plus précoces, une augmentation du nombre de génération et la remontée de certaines espèces. Les hivers doux favorisent les pucerons et avec les étés secs les charançons, punaises, acariens seront plus nombreux (Chambre d'Agriculture Saône et Loire, 2020).

### 2.1.3 Durée de la période de végétation

Le choix d'une culture adaptée aux conditions locales est déterminant pour la réussite des cultures implantées. Au-delà de l'espèce choisie, le choix variétal est également décisif pour certaines espèces puisqu'il permet une meilleure adéquation entre les besoins de la culture et les caractéristiques du

site, la durée de la période de végétation notamment. Pour choisir la variété la mieux adaptée, les agriculteurs peuvent se baser sur les listes recommandées qui précisent la précocité des différentes variétés. Par rapport à une variété tardive de maïs, une variété précoce a un cycle plus rapide et un besoin inférieur en chaleur exprimée en degrés jour (dj) pour arriver à maturité, mais son potentiel de production est moins important.

L'exemple le plus connu est celui du maïs pour lequel le rendement et la durée de périodes de végétation sont très variables selon la précocité de la variété. Pour le maïs, on utilise l'indice de précocité FAO qui va de 100 à 900. Une différence de 100 correspond environ à dix jours de végétation supplémentaires. Les indices FAO étant déterminés au niveau européen, ces valeurs sont adaptées aux conditions suisses sur la base des essais effectués en Suisse. Sur la liste recommandée de 2021 (Hiltbrunner et al., 2021), on retrouve des variétés allant de très précoces et précoces (Groupe de précocité FAO 170–210) adaptées au Nord des Alpes à mi-tardives (Groupe de précocité FAO 400–550) destinées au Sud des Alpes. Une étude récente (Buzzi et al., 2021) a évalué la surface de terre arable favorable à la culture de maïs grain et ensilage pour trois groupes de précocité ; précoce, mi-précoce et mi-tardif. Les résultats montrent que le maïs ensilage peut être cultivé sur environ 70% (variétés mi-tardives à maturité) et jusqu'à 90% (variétés précoces à maturité) des terres arables actuelles (Fig. 8, à gauche). Pour le maïs grain, les parts de surfaces favorables sont inférieures: 30% des terres arables avec des variétés mi-tardive à maturité et environ 60% avec des variétés précoces (Fig. 8, à droite). Le maïs pourrait servir de référence pour un ensemble de culture de printemps pour suivre l'évolution de l'aptitude du site en fonction du changement climatique.

On retrouve également différents groupes de précocité sur la liste recommandée du soja avec des variétés très précoces arrivant à maturité 11 jours avant des variétés mi-tardives (Vonlanthen et al., 2020). Des indications sur la précocité des variétés sont disponibles pour la majorité des espèces comme le colza (Laurent et al., 2020b), le tournesol (Laurent et al., 2020a) ou l'épeautre (Agridea 2020).

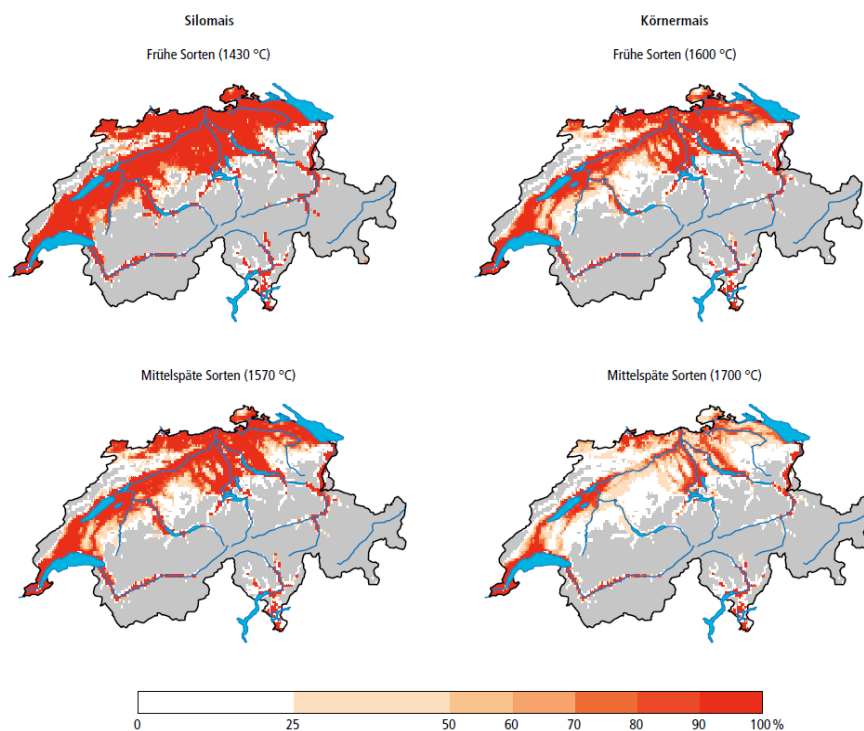


Figure 8. Proportion d'années de la période de référence 2000-2019 (en %) au cours desquelles les sommes de chaleur (du 1er mai au 15 octobre) des variétés de maïs précoce (en haut) et mi-tardive (en bas) ont été atteints (à gauche : maïs ensilage ; à droite : maïs grain) (adapté de Buzzi et al., 2021)).



## 2.2 Qualité chimique des sols

La méthode permettant d'estimer l'aptitude agricole d'un site n'inclut aucune information concernant la qualité chimique des sols (présence de pesticides ou métaux lourds). Certaines substances accumulées dans les sols se retrouvent pourtant dans les plantes récoltées, les rendant impropres à la consommation. Un exemple est celui des pesticides très persistants comme les organochlorés. Le cahier des charges de Bio Suisse recommande aux producteurs de réaliser une analyse de sol avant de cultiver pour la première fois des cucurbitacées car ces espèces absorbent très facilement ce type de pesticides. Une analyse est systématiquement exigée lors de la construction ou de la reprise de serres ou tunnels plastiques. Un autre exemple de pollution limitant la production de cucurbitacées est celui des dioxines/furanes dont certaines zones de pollution ont été identifiées très récemment dans la ville de Lausanne. A la suite d'analyses de sol, une carte des potentiels de pollution maximums a été réalisée sur la base d'une modélisation. Cette carte disponible sur le guichet cartographique du canton de Vaud donne des recommandations sanitaires pour chaque classe définie. Ce type de carte devrait être généralisé à l'échelle de la Suisse pour différents contaminants et utilisé pour définir l'aptitude agricole d'un site.

## 2.3 Facteurs biotiques

Les paramètres permettant d'estimer l'aptitude des sols dans la méthode actuelle n'incluent aucun facteur biotique. Pourtant, ces facteurs peuvent limiter certaines cultures. Des cartes indiquant la présence ou le risque de présence existent déjà pour certains facteurs, notamment pour les néophytes, mais pour d'autres, l'information doit encore être rassemblée.

### 2.3.1 Néophytes et adventices indigènes problématiques

“Les néophytes envahissantes sont des espèces exotiques introduites après l'an 1500 par l'homme et qui s'établissent dans des habitats ou des écosystèmes naturels ou proches de l'état naturel, elles modifient et menacent les communautés vivantes indigènes. Les espèces envahissantes se répandent rapidement et causent des dommages dans les domaines de la biodiversité, de la santé et/ou de l'économie” (Sanu, agridea, SKEW/CPS, 2005). Info Flora a publié en 2014, une liste noire d'espèces envahissantes en Suisse possédant un fort potentiel de propagation et causant des dommages importants et prouvés (Info Flora, 2014). Leur expansion doit être empêchée. On retrouve également une liste d'observation qui inventorie les néophytes envahissantes possédant, selon les connaissances actuelles, un potentiel de propagation modéré à fort en Suisse et causant des dommages modérés ou forts. La présence et l'expansion de ces espèces doivent être surveillées, et des connaissances supplémentaires sur ces espèces doivent être réunies. Sur le guichet cartographique (<https://map.geo.admin.ch>), on retrouve déjà un set de plantes exotiques envahissantes qui contient les cartes de distribution potentielle pour 56 espèces envahissantes en Suisse et répertoriées dans la Liste Noire et la liste d'observation, ou présentes dans les pays voisins et ayant le potentiel de coloniser la Suisse. Les cartes des espèces connues pour être problématiques en agriculture (Table 3) devraient être prises en compte lors de l'évaluation d'un site puisque la présence de ces adventices limite le potentiel de production, augmente la charge de travail dû au contrôle et à l'arrachage, et entraîne un risque de contamination des récoltes.

Table 3. Néophytes envahissantes, nouvelles plantes adventices et plantes problématiques en agriculture (source : Sanu, agridea, SKEW/CPS, 2005)

	Espèce	Milieu envahi	Cantons qui ont explicitement mentionné l'espèce
<b>Groupe I :</b> espèces pouvant affecter directement la production agricole	<i>Ambrosia artemisiifolia</i> (Ambroisie)	Grandes cultures (tournesol), bordures de champs, friches	FR, GE, NE, TI, VD
	<i>Artemisia verlotiorum</i> (Armoise des frères Verlot)	Grandes cultures, herbages, prairies extensives	TI
	<i>Abutilon theophrastii</i>	Grandes cultures	TI
	<i>Cyperus esculentus</i> (Souchet comestible)	Grandes cultures, cultures maraîchères	TI
	<i>Senecio jacobea</i> (Séneçon jacobée)	Herbages	FR, VD
	<i>Cirsium arvense</i> (Chardon des champs)	Grandes cultures, jachères, herbages	FR, GE, NE, TI, VD
	<i>Sorghum halepense</i> (Sorgho d'Alep)	Grandes cultures, jachères, herbages	TI
	<i>Heracleum mantegazzianum</i> (Berce du Caucase)	Herbages de montagne	
	<i>Senecio aquaticus</i> (Séneçon aquatique)	Herbages	Suisse centrale
	<i>Senecio inaequidens</i> (Séneçon du Cap)	Vignes, (pâturages - pas encore le cas mais possible)	FR, VD
	<i>Phytolacca americana</i> (Raision d'Amérique)	Vignes, vergers	
<b>Groupe II:</b> espèces présentes sur des surfaces agricoles mais qui n'affectent pas directement la production	<i>Solidago canadensis</i> (Solidage du Canada)		GE, NE, TI
	<i>Solidago gigantea</i> (Solidage géante)		GE, NE, TI
	<i>Buddleja davidii</i> (Buddleia de David)		NE, TI
	<i>Reynoutria japonica</i> (Renouée du Japon)		NE, TI
<b>Groupe III</b> espèces à surveiller	<i>Robinia pseudoacacia</i> (Robinier faux-acacia)		GE, TI

Parmi ces espèces, on retrouve l'Ambroisie avec 31 foyers connus et répertoriés. Cette espèce fait l'objet de plusieurs mesures dont une obligation d'annonce et de lutte sur la SAU (OPV) et une interdiction de vente (ODE). L'ambroisie se développe en cultures de printemps. Elle est particulièrement problématique dans les cultures sans herbicides, ainsi que dans le tournesol, le soja, le maïs, le sorgho et le pois, du fait qu'elle est très concurrentielle. La nuisibilité est variable selon sa densité, le type de culture et l'efficacité des méthodes de gestion utilisées. En culture de tournesol,

une perte de l'ordre de 3q/ha par tranche de 10 ambrosies au m<sup>2</sup> avec une perte de rendement qui peut aller jusqu'au 2/3 de la récolte est observée (Vuillemin et Duroueix, 2020). Les agriculteurs concernés par des surfaces infestées doivent renoncer aux cultures de printemps qui multiplient les semences d'ambrosie. Il est également nécessaire d'évacuer l'ensemble des plantes ou de broyer la végétation avant la floraison.

Un autre exemple est celui du souchet comestible, une espèce pérenne très concurrentielle envers les espèces cultivées, qui se propage essentiellement par ses tubercules. Son expansion est très problématique du fait d'un grand risque de transporter des tubercules d'un champ à l'autre avec les machines. Il est donc essentiel de nettoyer les machines et outils utilisés sur une parcelle infestée avant d'aller dans d'autres parcelles encore indemnes. Dans les zones infestées, les cultures maraîchères et les sarclées sont abandonnées au profit de céréales, avec des conséquences financières considérables.

### 2.3.2 Maladies (nouvelles maladies et maladies endémiques localisées) et ravageurs

Certaines maladies et certains ravageurs peuvent entraîner de fortes baisses de rendement en particulier lorsqu'aucun moyen de lutte directe n'existe ou lorsque les solutions sont très limitées. Ces dernières années, en relation avec la réduction des pesticides autorisés, certaines cultures ont vu leur rentabilité économique fortement réduite, pouvant aller jusqu'à l'abandon de certaines cultures dans les zones touchées en raison de ravageurs ou maladies. Ces derniers doivent être pris en compte pour l'estimation des sites. Le site d'Agrométéo ([agrometeo.ch](http://agrometeo.ch)) donne une première indication concernant le risque de certaines maladies touchant le blé (septorioses, piétin verse, rouilles), l'orge (helminthosporiose, rouilles, oïdium) et la pomme de terre (mildiou). Il informe également du risque pour la pyrale du maïs, et certains ravageurs du pois et du colza. Cette information doit être complétée par une évaluation du risque pour d'autres maladies ou ravageurs en cartographiant les zones contaminées et ainsi suivre l'évolution du risque. Quelques exemples sont donnés ci-dessous :

#### **Syndrome des basses richesses – SBR**

Le syndrome des basses richesses (SBR), maladie émergente en Suisse, touche sévèrement la culture betteravière depuis 2017. La maladie est causée principalement par la bactérie *Candidatus Arsenophonus phytopathogenicus*, transmise à la betterave par la cicadelle *Pentastiridius leporinus*. Cette cicadelle, à l'origine observée dans des roselières, est désormais capable de s'associer à des espèces cultivées, notamment la betterave et le blé. La cause reste mal connue mais pourrait être liée au changement climatique. Le SBR conduit à une chute drastique de la teneur en sucre et de son extractibilité dans les betteraves. Il n'existe actuellement aucun moyen de lutte directe. La recherche travaille actuellement sur des variétés tolérantes au SBR ainsi que sur des facteurs qui permettraient d'altérer l'intensité des symptômes de SBR, comme l'irrigation et l'effet des zones ombragées. Si aucune solution n'est trouvée, la pérennité de la culture dans certaines régions pourrait être menacée en raison des pertes économiques résultant de fortes diminutions de la teneur en sucre. (Schaerer et al., 2019).

#### **Jaunisse nanisante de l'orge**

La jaunisse nanisante est causée par des virus BYDV transmis par les pucerons. L'activité des pucerons est étroitement liée à la température : les vols démarrent à partir de 12°C et l'activité de ponte augmente jusqu'à 25°C. Au-delà de 30°C et en dessous de -5 à 12°C (variations selon l'espèce), les pucerons meurent. La virose transmise par les pucerons peut entraîner une baisse de rendement allant de 5 % dans les cas de faibles infestations (qui passent souvent inaperçues) à une perte totale de la culture dans les cas les plus graves. Sur orge, espèce particulièrement sensible à la JNO, la perte

moyenne s'élève à 25 q/ha. Comme pour le SBR, il n'existe actuellement aucun traitement permettant de combattre le virus. (Arvalis)

### **Chrysomèle du maïs**

La chrysomèle du maïs reste un ravageur problématique. Depuis 2003, la situation de l'espèce en Suisse fait l'objet d'une surveillance annuelle au moyen de pièges à phéromones. Depuis 2020, les pièges sont répartis selon une grille sur toute la surface de culture du maïs en Suisse, du fait qu'un plus grand nombre de chrysomèles des racines du maïs adultes volent régulièrement depuis les pays voisins. En cas de capture, une restriction de la rotation des cultures est obligatoire (interdiction de semer du maïs après maïs) dans un rayon de 10 km autour de l'emplacement du piège (zone délimitée). Au Tessin, la chrysomèle des racines du maïs est capturée chaque année dans presque tous les pièges depuis l'an 2000, car les adultes de ce coléoptère volent régulièrement depuis l'Italie. Une interdiction de semer du maïs après maïs est donc en vigueur dans le canton du Tessin depuis 2004. D'autres régions ont été touchées ces dernières années, comme la Côte lémanique en 2017. Une carte des zones de restriction de semis de maïs est disponible sur le site d'Agroscope sur la page dédiée aux organismes nuisibles de quarantaine et pourrait être utilisée pour définir l'aptitude des sites.

## 2.4 Facteurs structurels

### 2.4.1 Infrastructures régulant l'état hydrique du sol

Dans les chapitres précédents, nous avons mentionné le caractère essentiel de l'eau dans le sol. L'estimation d'un site se base actuellement sur les précipitations et sur les facteurs influant l'état hydrique du sol. Pour avoir une image complète de la situation, l'estimation devrait également prendre en compte les installations et le potentiel d'irrigation de différentes régions, respectivement parcelles. En effet, avec l'augmentation des températures estivales, les besoins en irrigations deviennent plus importants mais parallèlement, les niveaux d'eau de plusieurs bassins versants du Plateau baissent. Des simulations montrent que certaines régions comme Glatt-Töss, La Birse ou Broye-Mentue seront confrontées à des pénuries d'eau (Fuhrer et Calanca, 2014).

Une cartographie des installations permettant de réguler le niveau de la nappe devraient également être prise en compte.

## 2.4.2 Zones de protection des eaux souterraines

Les zones de protection des eaux souterraines (S1, S2, S3), limitent l'activité agricole. Dans la zone S1, elle est même interdite. La zone S2 restreint l'utilisation de certains amendements organiques et produits phytosanitaire, la culture de certaines espèces exigeantes peut donc se révéler difficile. Une carte de ces zones est disponible sur le guichet cartographique suisse. Cette information devrait être intégrée pour l'estimation de l'aptitude des sites.

Tableau 4. Mesures de protection selon les zones

Type de secteur	Temps de transfert dans les eaux	Mesures de précaution, restrictions
<b>Zone S1</b> <b>Zone de captage située à proximité immédiate du captage</b>	< 1 jour (en fonction de la géométrie du captage)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Aucune activité agricole</li> <li>■ Aucune construction</li> <li>■ Souvent protégée par une clôture</li> </ul>
<b>Zone S2</b> <b>Zone de protection rapprochée</b>	< 10 jours	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Aucune construction nouvelle</li> <li>■ Aucun épandage d'engrais de ferme liquide, de boues d'épuration ou de produits phytosanitaires, sauf exception</li> </ul>
<b>Zone S3</b> <b>Zone de protection éloignée</b>	< 20 jours	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Pas de constructions artisanales ou industrielles</li> <li>■ Pas d'exploitation de matériaux</li> <li>■ Pas d'épandage de boues d'épuration</li> <li>■ Autres pratiques agricoles (conformes au PER) autorisées</li> <li>■ Fosse à purin hors sol autorisées</li> <li>■ Citernes à hydrocarbures non enterrées autorisées</li> </ul>

## 3 Conclusions

### 3.1 Importance des facteurs sol et évolution depuis 1997

Actuellement l'aptitude d'un site est évaluée en fonction du régime hydrique, de la profondeur utile, de la pierrosité, de la texture et de la teneur en matière organique. Tous ces paramètres sont d'une grande importance pour la production agricole puisqu'ils influencent la disponibilité en eau et en éléments nutritifs, la stabilité structurale du sol ainsi que la réaction au travail du sol.

Le changement climatique conduit à des précipitations de plus en plus irrégulières avec des épisodes de sécheresse et ponctuellement d'excédent. Les paramètres sol seront donc plus importants encore, notamment la texture, la teneur en matière organique et la profondeur utile qui influencent la réserve utile du sol, mais aussi son fonctionnement. Ces paramètres ont également gagnés en importance en raison de l'évolution des pratiques, avec l'intervention de machines plus lourdes et peu de considération de l'état du sol. Un suivi attentif et détaillé de la texture, la teneur en matière organique et la profondeur utile est donc nécessaire pour évaluer au mieux l'aptitude agricole des sites. L'importance de la pierrosité a peu évolué. Pour la culture de la pomme de terre, le tamisage est devenu une pratique courante. Néanmoins les pommes de terre sont de plus en plus cultivées sur des sols homogènes, peu caillouteux. L'hydromorphie représentait également une limite pour l'exploitation agricole mais son influence devrait être réduite dans le cadre du changement climatique.

Au niveau climatique, la limite de la période de végétation a également été réduite grâce à des développements variétaux. L'importance de la topographie a peu évolué.

### 3.2 Facteurs manquants

L'étude a mis en évidence qu'un certain nombre de facteurs ne sont actuellement pas pris en compte mais peuvent fortement influencer l'aptitude d'un site. Parmi les facteurs sol, on retrouve la structure du sol et la compaction qui sont davantage exposées aux pratiques culturales que par le passé dû à l'évolution des pratiques agricoles (poids des machines, manière d'intervenir). Cette information paraît pourtant essentielle puisqu'elle permet un bon enracinement des cultures avec une bonne alimentation en nutriments et en eau.

Les facteurs climatiques devraient également être développés et prendre en compte la température au cours de l'année avec notamment des indications concernant les épisodes de gel et de très fortes températures. Ils devraient également inclure la répartition des précipitations au cours de l'année.

En outre, deux autres types de facteurs ne sont pas utilisés : les facteurs biotiques (maladies, ravageurs et adventices) ainsi que les facteurs structurels. L'importance des facteurs biotiques pour l'estimation de l'aptitude d'un site est pourtant essentielle et pourrait encore augmenter dans le cadre du changement climatique.



## Bibliographie

- Agridea, 2020a. Liste recommandée des variétés d'épeautre pour la récolte 2021
- Agridea, 2020b. Liste recommandée des variétés d'orge d'automne pour la récolte 2021
- Al Majou H., 2008. Étude et prédiction des propriétés de rétention en eau des sols : Prise en compte de la composition et de l'état structural du sol. Sciences de la Terre. Université d'Orléans.
- Arvalis – institut du végétal, Jaunisse Nanisante de l'Orge (JNO). Disponible sur : [http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche\\_accident/fiches\\_accidents.php?mode=fa&type\\_cul=1&type\\_acc=7&id\\_acc=53](http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=1&type_acc=7&id_acc=53)
- Brunner J., Jäggli F., Nievergelt J., Peyer K., 1997. Cartographie et estimation des sols agricoles. Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture, FAL Zurich-Reckenholz.
- Burkhalter F., Chervet A., Bieri M., 2010. Limaces en grandes cultures. Revue UFA, 3
- Buzzi F., Hiltbrunner J., Holzkämper A., Calanca P., 2021. Temperatursummen-Karten für die Sortenwahl im Maisanbau. Agrarforschung Schweiz 12: 1–8.
- Colombi T., Walter A. (2016) : Root responses of triticale and soybean to soil compaction in the field are reproducible under controlled conditions. Functional Plant Biology 43, 114–128. doi:10.1071/FP15194
- Cousin I., Therond O., 2017. 8.7. Stockage et restitution de l'eau. Etude Inra « EFESE-écosystèmes agricoles » – Rapport scientifique. hal-02789434
- Fuhrer J. et Calanca P., 2014. Irrigation et changement climatique: une analyse régionale du déficit en eau. Recherche Agronomique Suisse 5: 256–263
- Gendry M., 2018. La réserve utile des sols. SOLAG, Bulletin Sol et Agronomie des Chambres d'agriculture des Pays de la Loire, 4.
- Gissol.fr. Réserve utile en eau des sols. Disponible sur : <https://www.gissol.fr/thematiques/reserve-utile-en-eau-des-sols-18>
- Hiltbrunner J., Buchmann U., Calanca P., Huber T., Pignon T., Girard M., Morel I., 2021. Liste recommandée des variétés de maïs pour la récolte 2021. Agroscope Transfert 379.
- Info Flora 2014; Listes des espèces exotiques envahissantes; S.Buholzer, M.Nobis, N. Schoenenberger, S. Rometsch. Disponible sur : <https://www.infoflora.ch/>
- Johannes A., Matter A., Schuling R., Weiskopf P., Baveye P., Boivin P., 2017. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? Geoderma, 302: 14-21.
- Johannes A., Weiskopf P., Boivin P., Gondret K., Leopizzi S., Lamy F., Füllemann F., Boizard H., Baize D., Ball B., Cloy J., Munkholm L., Guimaraes R., 2020. VESS2020 Evaluation visuelle de la structure du sol. Disponible sur : <https://www.progres-sol.ch/fileadmin/progres-sol/VESS2019.pdf>
- Laurent E.-A., Baux A., Nussbaum V., 2020a. Liste recommandée des variétés de tournesol pour la récolte 2021. Agroscope Transfer 373.
- Laurent E.-A., Nussbaum V., Strahm S., Baux A., 2020b. Liste recommandée des variétés de colza d'automne pour la récolte 2021. Agroscope Transfer 316.

- Lecomte C., Carroué B, Biarnès V., Hanocq E., Larmure A., Castel T., 2015. Nouveautés variétales de Pois Hr, adaptation au changement climatique. Journée de lancement «Plan Protéines Bourgogne», Chalon-sur-Saône, France. (hal-02743637)
- Marsden C, 2014. Importance de la Matière Organique du Sol. Disponible sur <https://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/ImportanceMO.html>
- Morschel J., Fox D., 2004. Une méthode de cartographie du risque érosif : exemple d'application aux collines du Terrefort lauragais.. Mapped Monde, Maison de la géographie, pp.1 - 11.
- Nicolas D. 2019. Elongation automnale des colzas : connaissez-vous les leviers à activer ? Réussir Grandes cultures. Disponible sur <https://www.reussir.fr/grandes-cultures/plusieurs-manieres-de-controler-lelongation-automnale-des-colzas>
- Pellet D., Gindrat D., Frei P., Hebeisen T., 2002. L'hivernage du colza d'automne. Revue suisse Agric. 34: 205-210.
- Poudou S. Evaluer la réserve utile de son sol. Chambre d'agriculture Ariège.
- Sanu, agridea, SKEW/CPS, 2005. Plantes exotiques envahissantes (néophytes) en Suisse: les besoins des groupes d'intéressés issus de la pratique. Rapport de synthèse d'ateliers de travail. 23 pages
- Schaad N., Levy Häner L., Morisoli R., Bernet R., Girard M., Courvoisier N., Berberat J., Grandgirard R., Graf B., Streit M., Weisflog T., 2020. Liste recommandée des variétés de céréales pour la récolte 2021. Agroscope Transfer 334.
- Schaerer S., Bussereau F., Breitenmoser S., Sostizzo T., Bünter M., Cornamusaz B., 2019. Syndrome des basses richesses – SBR. Agroscope fiches techniques n°97.
- Sinaj S., Richner W., 2017. Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF 2017). Recherche Agronomique Suisse 8, Publication spéciale, 276 p.
- Vuillemin F. et Duroueix F., 2020. Gestion de l'ambrosie à feuille d'armoise en tournesol et soja. Terre Innovia. Disponible sur : <https://www.terresinovia.fr/-/gestion-de-l-ambrosie-a-feuille-d-armoise>.
- Vonlanthen T., Tallant M., Baux A., 2020. Liste recommandée des variétés de soja pour la récolte 2021. Agroscope Transfer 376.
- Wiki.aurea.eu, 2016. Evaluation de la pierrosité. Disponible sur : [https://wiki.aurea.eu/index.php/Evaluation\\_de\\_la\\_pierrosité](https://wiki.aurea.eu/index.php/Evaluation_de_la_pierrosité)