



HAL
open science

Un cadre conceptuel pour l'évaluation des fonctions des sols : vers une base commune revue bibliographique et cas d'application

Henri Lechevallier

► To cite this version:

Henri Lechevallier. Un cadre conceptuel pour l'évaluation des fonctions des sols : vers une base commune revue bibliographique et cas d'application. Sciences de l'environnement. 2023. hal-04852821

HAL Id: hal-04852821

<https://hal.inrae.fr/hal-04852821v1>

Submitted on 21 Dec 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE PARIS-SACLAY

université
PARIS-SACLAY

AGROPARISTECH

AgroParisTech

**Mention "Agrosciences, Environnement, Territoires, Paysage,
Forêt"**

Parcours "Gestion des sols et services écosystémiques"

**Un cadre conceptuel pour l'évaluation des fonctions des sols :
vers une base commune – revue bibliographique et cas
d'application**

**A conceptual framework for the study of soil functions: towards a
common base – bibliographical review and case study**

Par : Henri Lechevallier

Stage effectué à l'UMR LISAH

Sous la direction de **LAGACHERIE Philippe**
WADOUX Alexandre

LISAH

Soutenu le 07 septembre 2023, à Palaiseau, devant le jury composé de :

COQUET Yves (AgroParisTech)
MICHELIN Joël (AgroParisTech)
QUANTIN Cécile (Université Paris Saclay)

Remerciements

Je voudrais commencer par remercier chaleureusement Alexandre Wadoux et Philippe Lagacherie, mes encadrants de stage, de m'avoir laissé une grande liberté pendant le stage, de m'avoir guidé et soutenu même lorsque je n'allais pas dans la direction prévue, et de m'avoir donné matière à travailler et à réfléchir pour arriver à un résultat dont je suis assez satisfait (ce qui n'était pas donné en considérant la nature exploratoire du sujet !).

Ensuite, je souhaite remercier Laurent Prévot de l'équipe Ecohydrologie pour sa contribution à l'élaboration de l'exemple d'application et pour sa disponibilité pour répondre à mes questions, notamment concernant la compréhension des équations du modèle WaLIS, et la validation et l'interprétation des résultats obtenus.

Je voudrais également remercier mes camarades de bureau, Merveil Ebengo-Okoto, Djibril Mbodj et Quentin Guilloit pour l'ambiance studieuse et les moments de pause au bureau. Merci plus particulièrement à Quentin pour m'avoir montré l'exemple à ne pas suivre en commençant la rédaction de son rapport de stage deux semaines avant l'échéance.

Je tiens à remercier les autres stagiaires, doctorants et non permanents, Idris, Sotirios, Julia, Léa, Evaelle, Martin, Guillaume, Wissal, Imen, Alexis, Pauline et Mariem pour les moments de convivialité et d'amitié aux repas et en dehors du laboratoire.

Enfin, je remercie l'ensemble des membres de l'équipe sol et du LISAH pour m'avoir accueilli avec gentillesse, et plus particulièrement ceux qui ont pu m'apporter une aide ponctuelle dans mon travail.

Table des matières

1-	Introduction	1
1-1.	Contexte : les enjeux de l'évaluation des sols	1
1-2.	Eliminer une première ambiguïté : les « fonctions du sol »	2
1-3.	Les méthodes d'évaluation des sols en sciences du sol.....	3
1-4.	Le manque de prise en compte des sols dans d'autres domaines.....	5
1-5.	Qu'est-ce qu'un cadre conceptuel ?	6
1-6.	Quels sont les besoins auxquels ce cadre conceptuel doit répondre ?.....	7
1-7.	Objectifs du stage	7
2-	Matériels et méthodes	8
2-1.	Elaboration du cadre conceptuel	8
2-2.	Revue de la littérature	8
2-3.	Exemple d'application : présentation du modèle.....	10
3-	Le cadre conceptuel	11
3-1.	Représentation du sol	11
3-2.	Les utilisateurs du sol : intérêts et impacts	14
3-3.	Concepts pour la quantification : niveau de réalisation, capacité, potentiel....	16
3-4.	Concepts pour la quantification : dégradation, compatibilité, soutenabilité	19
4-	Résultats : revue bibliographique	21
4-1.	Articles sélectionnés, forme de la revue	21
4-2.	Sélection des critères de comparaison.....	21
4-3.	La revue bibliographique	22
4-4.	Les méthodes d'évaluation.....	22
4-5.	Lien avec un utilisateur, évaluation d'une compatibilité	26
4-6.	La représentation du sol.....	27
5-	Résultats : exemple d'application	28
5-1.	Scénario.....	28
5-2.	Elaboration de la méthode à l'aide du cadre conceptuel.....	28
5-3.	Les parcelles et les pratiques agricoles.....	29
5-4.	Paramétrisation et initialisation du modèle	30
5-5.	Résultats des simulations.....	32
5-6.	Pour aller plus loin.....	33
6-	Discussion.....	34
6-1.	L'intérêt du cadre conceptuel.....	34
6-2.	Enseignements de la revue de littérature	34
6-3.	Conséquences méthodologiques du cadre conceptuel.....	35

6-4. Limites du cadre conceptuel.....	36
7- Conclusion	37
Références.....	38
Annexes.....	44
Annexe 1 : complément du cadre conceptuel : glossaire.....	47
Annexe 2 : Complément à la revue bibliographique : résultats de recherche sur le Web Of Science	50
Annexe 3 : schéma de fonctionnement de WaLIS	64
Annexe 4 : paramètres d'entrée des simulations sur WaLIS.....	65
Annexe 5 : positionnement du cadre conceptuel dans la littérature	67
Annexe 6 : sortie terrain dans le bassin-versant du Rieutort : caractérisation des sols des parcelles expérimentales – compte-rendu	75
Résumé.....	94
Abstract.....	95

Liste des figures

Figure 1 : schéma illustrant la chaîne de conséquences entre les activités humaines et la dégradation des sols	1
Figure 2 : illustration de deux méthodes d'évaluation des sols : le <i>Soil Management Assessment Framework</i> (SMAF) (Andrews et al. 2004) (haut), et la modélisation mécaniste de Choquet et al. (2021) et Ellili-Bargaoui et al. 2021 (bas).....	4
Figure 3 : schéma représentatif des différents éléments qui participent au fonctionnement du sol et à la réalisation de fonctions par les sols.....	11
Figure 4 : lien entre les fonctions du sol, l'intérêt humain, acteurs et forçage anthropique.	15
Figure 5 : schéma illustratif de l'impact des facteurs anthropiques sur le fonctionnement du sol.	15
Figure 6 : schéma illustratif de la démarche pour relier les intérêts des utilisateurs aux fonctions contribuant à ces intérêts.	16
Figure 7 : illustration des 3 concepts de base pour la quantification dans l'exemple d'une succession d'usage (gauche), et zoom sur le niveau de remplissage instantané d'une fonction (droite). Les indices renvoient aux concepts équivalents dans la littérature. Pour plus d'information sur ces correspondances, se référer à l'annexe 5.....	17
Figure 8 : figure tirée de Ojeda & Saurin (2014) : différentes stratégies d'irrigation possibles pour contrôler l'état hydrique du vignoble en fonction de la période végétative et du type de produit recherché.....	29
Figure 9 : Localisation des parcelles expérimentales dans le bassin versant du Rieutort.	29
Figure 10 : sondages pédologiques à la tarière des sols des parcelles P1 (gauche) et P7 (droite).....	30
Figure 11 : comparaison des climats sur les deux années simulées (gauche), et transpiration simulée de la vigne et de l'enherbement pour P1 pour l'année 2018-2019 (droite).....	31
Figure 12 : évolution temporelle simulée du niveau de remplissage en eau du compartiment accessible à la vigne (gauche) et du potentiel de base (droite) pour P1 et P7 pour les deux années modélisées. ASWv : available soil water for vine plants.....	32

Liste des tableaux

Tableau 1 : tableau récapitulatif des propriétés et caractéristiques de l'environnement qui impactent le niveau de remplissage, la capacité et le potentiel d'une fonction.....	18
Tableau 2 (pages suivantes) : tableau de revue bibliographique selon les critères définis à partir du cadre conceptuel.....	22
Tableau 3 : processus, propriétés et facteurs environnementaux pris en compte dans l'évaluation avec WaLIS.....	30
Tableau 4 : détermination des paramètres d'initialisation du modèle pour les parcelles P1 (en bleu) et P7 (en jaune). Le tableau se lit indépendamment pour chaque couleur.....	31

Abréviations

WaLIS: Water baLance for Intercropped Systems

InVEST: Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoff

TTSW: total transpirable soil water (quantité d'eau maximum transpirable du sol)

ASW: Available Soil Water

SMAF: Soil Management Assessment Framework

SWAT: Soil and Water Assessment Tool

LCA: Life Cycle Assessment

1- Introduction

1-1. Contexte : les enjeux de l'évaluation des sols

Les sols sont à l'interface entre l'atmosphère, la biosphère, la lithosphère et l'hydrosphère (Jónsson & Davíðsdóttir, 2016; Nie et al., 2021). Il participe à la fourniture de nombreux services écosystémiques, qui sont les bénéfices que les êtres-humains obtiennent des écosystèmes (Costanza et al., 1996). Les sols sont en particulier importants pour la production de biomasse, et sont à la base de notre consommation de nourriture (FAO, 2015). Cependant, les sols constituent une ressource non renouvelable (FAO, 2015), et ils sont menacés. L'exploitation des sols pour obtenir cette biomasse, mais aussi l'étalement urbain, les pollutions liées aux activités humaines peuvent entraîner des dégradations du sol, parfois irréversibles : perte de matière organique, érosion, contamination, perte de biodiversité, etc (European Commission, 2002; Huber et al., 2008; European Environment Agency, 2023). Ces dégradations ont pour conséquence une perte de la capacité des sols à fournir des services écosystémiques (European Environment Agency, 2023), qui est exacerbée par le réchauffement climatique et la transformation des exploitations agricoles d'une gestion de subsistance à une gestion industrielle mondialisée (FAO, 2021). Cela est illustré sur la Figure 1 : d'un côté la gestion du sol centrée sur l'obtention d'un nombre restreint de service, et d'un autre côté les impacts indirects des activités humaines mènent conjointement à une dégradation du sol. Ainsi, les sols sont vulnérables, et la fourniture actuelle et future des services écosystémiques indispensables à nos sociétés n'est pas garantie. Cela est particulièrement préoccupant dans le contexte de croissance démographique et de malnutrition pour une partie importante de la population actuelle (FAO, 2021).

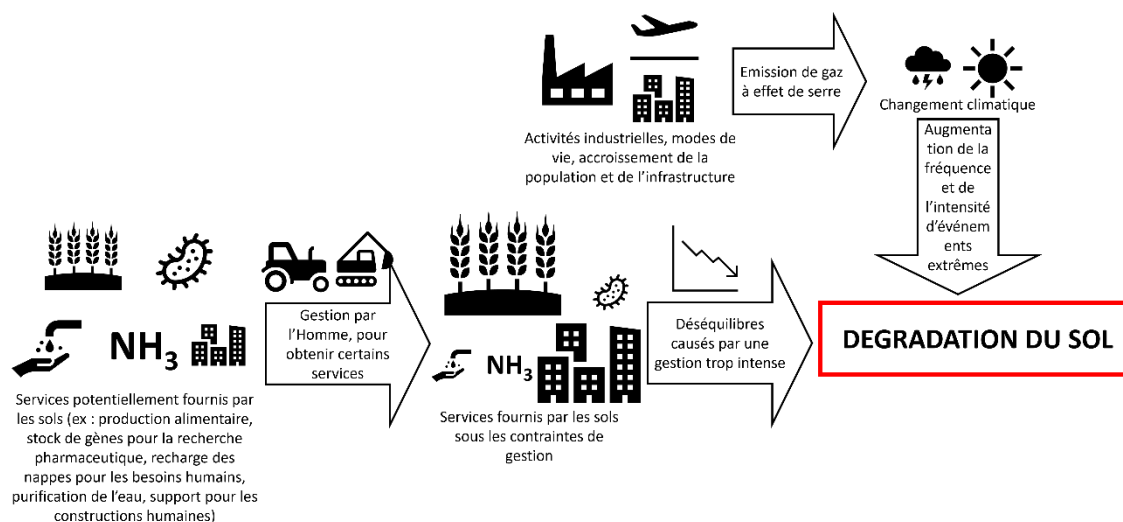


Figure 1 : schéma illustrant la chaîne de conséquences entre les activités humaines et la dégradation des sols

Cela devrait nous donner des raisons suffisantes de protéger nos sols. Cependant, curieusement, le sol ne bénéficie en France toujours pas d'une protection spécifique (Renault et al., 2023). Cela devrait commencer à changer avec la loi européenne sur la santé des sols (Directorate-General for Environment, 2023). Il est très peu présent dans la littérature sur les services écosystémiques (Dominati et al., 2010), et lorsqu'il est traité, c'est avec des indicateurs simples (qui ne prennent pas en compte

l'ensemble des propriétés des sols) qui sont focalisés sur une ou deux fonctions (Greiner et al., 2017). InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoff), un des outils d'évaluation les plus aboutis en terme de validation par les pairs (Bagstad et al., 2013), ne prend pas en compte la dimension verticale du sol dans l'évaluation de services où sa contribution est majeure (régulation des inondations, purification de l'eau, recharge des nappes et des cours d'eau) (Natural Capital Project, 2022).

Renault et al., 2023 évoquent comme raison au manque de prise en compte des sols le manque d'indicateurs fiables et facilement accessibles. On peut cependant noter que, dans la littérature des sciences du sol, des notions comme la qualité et l'évaluation des sols pour des performances autres que la productivité agricole sont discutées depuis longtemps, au moins le début des années 1990 (Doran & Parkin, 1994; Karlen & Stott, 1994). De nombreuses études ont proposé des indicateurs et des méthodes multifonctionnelles d'évaluation des sols, par exemple Danner et al. (2003), Andrews et al. (2004), Moebius-Clune et al. (2016) et Debeljak et al. (2019).

L'évaluation des sols consiste à déterminer, sur la base des propriétés des sols, de leur usage, des pratiques, de leur environnement, et des connaissances des liens entre ces variables et le fonctionnement du sol, quelles sont les fonctions que remplit le sol et à quel niveau, quelles sont les potentialités du sol vis-à-vis de différentes fonctions et de différents usages, quel est le niveau de dégradation du sol, et quelles sont les évolutions que l'on peut attendre de ces quantités dans différents scénarios (d'usages, climatiques). L'évaluation peut s'adresser à un grand nombre d'acteurs, et donc avoir lieu à des échelles spatiales et temporelles différentes.

Dans la suite de l'introduction, on justifie la nécessité d'élaborer un cadre conceptuel pour aborder l'évaluation des sols : ambiguïté de certains termes dont la définition change en fonction des auteurs, diversité des méthodes existantes et inconsistances découlant du manque de précision des définitions de base, et enfin manque de prise en compte des sols dans la littérature extérieure aux sciences du sol et manque de ponts entre ces différentes disciplines.

1-2. *Éliminer une première ambiguïté : les « fonctions du sol »*

La définition du terme « fonction » n'est pas consensuelle pour les chercheurs qui travaillent sur l'évaluation des sols (Bünemann et al., 2018). Cependant, cette notion est utilisée depuis longtemps en sciences du sol et permet de mettre un nom sur quelque chose qui n'est pas un processus ni un service (Baveye et al., 2016). Ici, on considère que les fonctions sont définies comme ce que fait le sol indépendamment de tout intérêt humain. C'est une définition courante (Seybold et al., 1997; Rabot et al., 2018; Calvaruso et al., 2021). Une définition plus appliquée sera donnée par la suite (Partie 3-1).

Dans le texte, on utilise les tournures « évaluation des sols » et « évaluation des fonctions des sols », en général de manière interchangeable. Cependant, il existe une subtilité entre les deux. Déjà, « évaluation des sols » peut avoir une connotation monétaire : évaluer un bien, c'est en déterminer la valeur. L'utilisation des « fonctions du sol » permet d'éviter d'évoquer cet aspect monétaire, mais évoque plutôt un aspect biophysique, bien qu'une évaluation monétaire puisse entrer dans l'évaluation des fonctions du sol. Ensuite, toute évaluation du sol ne se base pas forcément explicitement sur des fonctions du sol. De nombreuses études n'emploient pas du tout ce terme. Cependant, pour nous, dans ces études, les fonctions du sol sont implicitement prises en compte dans l'interprétation de l'évaluation. En effet, ce qui nous intéresse dans l'évaluation des sols, c'est bien de savoir ce que fait le sol, ce que peut faire le sol, et les évolutions possibles de ces quantités. Par exemple, Fernández et al. (2020) évaluent

une « qualité des sols » mais n'emploient jamais le terme « fonction du sol ». Toutefois, dans la partie discussion, on peut trouver des phrases comme : « the negative effect of bulk density on pasture production ». Ici, la fonction de production sert à interpréter l'indicateur de densité apparente.

Le cadre conceptuel développé pendant le stage porte sur les méthodes d'évaluation des sols en général, mais pour nous, les fonctions de sols interviennent forcément dans l'évaluation, et il faudrait le rendre explicite, car ce sont les fonctions qui permettent de faire le lien avec les besoins d'un commanditaire d'une évaluation du sol (on verra dans le cadre conceptuel que ce « commanditaire » s'exprime en termes de services écosystémiques, que l'on peut lier aux fonctions du sol).

1-3. *Les méthodes d'évaluation des sols en sciences du sol*

Dans la littérature sur le sujet, on peut relever un certain nombre de méthodes pour évaluer des sols. Cette partie introductive vise à donner une vue générale de la diversité de ces méthodes et des concepts auxquels elles font appel. Une revue plus systématique de la littérature est réalisée en Partie Le cadre conceptuel4-3.

En Allemagne, une loi sur la protection des sols en 1998 (la Bundes-Bodenschutzgesetz) a mené au développement de différents outils d'évaluation. Dans Danner et al. (2003) et Bechler & Toth (2010), des méthodes d'évaluation pour différentes fonctions sont données. Elles consistent à combiner différentes propriétés du sol dans des tables de détermination pour noter chaque fonction de 1 à 5 selon un critère d'évaluation.

Ce type de méthode est repris dans Calzolari et al. (2016) et Greiner et al. (2018) pour réaliser des cartes de fonctions des sols à l'échelle régionale avec l'objectif de fournir de l'information sur la multifonctionnalité des sols à des décideurs. Rabot et al. (2022) utilisent aussi des indicateurs de différentes fonctions des sols, mais n'utilisent dans l'évaluation que des propriétés inhérentes du sol (stables sur le long terme), et quantifient ainsi un « potentiel de multifonctionnalité ». Les indicateurs servent à déterminer l'aptitude du sol à supporter différents usages.

Toujours avec la même approche méthodologique, Jost et al. (2021) quantifient les fonctions du sol dans leur état actuel et pour différents scénarios d'usage et d'évolution du climat. L'objectif est de sensibiliser les décideurs sur le caractère dynamique des fonctions des sols et l'impact de leurs décisions sur l'aptitude future des sols à remplir des fonctions.

Fernández et al. (2020) évaluent une qualité des sols pour des prairies d'une région d'Espagne. Ils partent d'un ensemble de propriétés du sol. Chaque propriété est associée à un score entre 0 et 1 via une fonction score, déterminée par les caractéristiques d'un jeu de données (valeurs minimales et maximales). Ensuite, les scores sont pondérés et sommés, les poids étant déterminés par une analyse statistique du jeu de données. Cela permet l'agrégation en un indice de qualité des sols unique, compris entre 0 et 1. Cette méthode pour l'évaluation des sols est très répandue (voir la Partie 2-2) et a été historiquement plébiscité par de nombreux auteurs pour l'évaluation de la qualité des sols (Karlen & Stott, 1994; Harris et al., 1996; Seybold et al., 1997).

Andrews et al. (2004) utilisent également des fonctions scores, mais dans un outil d'évaluation à visée plus large, qui prend en compte les objectifs de l'utilisateur, et évalue simultanément plusieurs fonctions. Pour eux, l'usage du sol et les performances attendues du sol doivent déterminer les fonctions à quantifier et les indicateurs à utiliser pour l'évaluation d'une « qualité dynamique ». Leur méthode est illustrée sur la Figure 2.

Vogel et al. (2019) proposent d'utiliser des fonctions scores pour évaluer deux quantités : l'état des fonctions, et leur potentiel. L'évaluation se base respectivement sur des propriétés dynamiques, et des propriétés inhérentes et des caractéristiques de l'environnement. La connaissance de ces deux quantités permet d'élargir le champ des questions que l'évaluation permet d'aborder. Par exemple, doit-on protéger les sols qui sont dans un bon état, ou alors ceux qui ont un haut potentiel ? Et si l'état est très éloigné du potentiel, comment s'en rapprocher ?

Vrebos et al. (2021) ont une méthode de quantification différente : ils ont entraîné des réseaux bayésiens pour prédire la réalisation de 4 fonctions pour 15 types de cultures à partir des sorties du modèle DayCent. Une cartographie à l'échelle européenne est réalisée, elle permet de visualiser les compromis, synergies et antagonismes entre les différentes fonctions.

Certains outils ont été pensés spécifiquement pour les agriculteurs (ou leurs conseillers), et fournissent également des pistes de gestion du sol (Moebius-Clune et al., 2016; Debeljak et al., 2019). Dans le Soil Navigator (Debeljak et al., 2019), les fonctions sont évaluées par agrégations successives de différents indicateurs qualitatifs grâce à un ensemble de règles de décisions. La particularité est le nombre d'indicateurs pris en compte et le nombre élevé de niveaux d'agrégation pour arriver au score final.

Dominati et al. (2014), Choquet et al. (2021) et Ellili-Bargaoui et al. (2021) font appel à une modélisation mécaniste des processus du sol pour évaluer le niveau de différents services écosystémiques liés au sol (illustré en Figure 2).

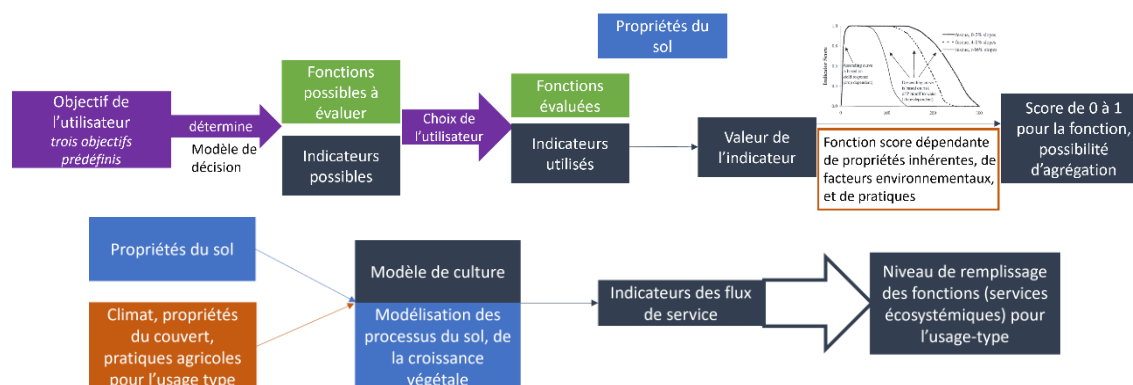


Figure 2 : illustration de deux méthodes d'évaluation des sols : le *Soil Management Assessment Framework* (SMAF) (Andrews et al. 2004) (haut), et la modélisation mécaniste de Choquet et al. (2021) et Ellili-Bargaoui et al. 2021 (bas).

Cette présentation des approches méthodologiques en science du sol n'est pas exhaustive mais volontairement longue. Cela permet de montrer :

- La diversité des approches : indicateurs construits par combinaison de propriétés du sol et de caractéristiques de l'environnement, fonctions scores, modélisation empirique, modélisation mécaniste.
- La diversité des quantités quantifiées et du vocabulaire utilisé : qualité (dynamique, inhérente), santé (par exemple dans Moebius-Clune et al., 2016), multifonctionnalité, état, potentiel, service écosystémique, etc.
- La diversité des objectifs poursuivis par les auteurs : élaborer des méthodes générales, ou alors centrées sur un usage spécifique, réaliser des cartes, produire de l'information pour des décideurs, servir d'outil d'aide à la décision pour des agriculteurs, faire des projections futures, etc.
- La difficulté à aborder cette littérature, qui résulte de sa diversité et du manque d'un cadre commun pour définir les différents termes et faire le lien entre objectifs

de l'étude, quantité quantifiée, méthode employée, hypothèses simplificatrices, et interprétation des résultats.

- La présence de difficultés méthodologiques récurrentes : détermination de seuils, prise en compte ou non de facteurs environnementaux et anthropiques, difficulté à cerner la quantité effectivement évaluée et le lien avec les objectifs avancés, etc.

1-4. Le manque de prise en compte des sols dans d'autres domaines

Les services écosystémiques apparaissent comme un concept privilégié à la base d'outils d'aide à la décision (Bagstad et al., 2013; Grizzetti et al., 2016; Therond et al., 2017). Ils permettent de relier le fonctionnement des écosystèmes au bien-être humain et pourraient être employés dans l'optique d'une gestion plus durable des ressources naturelles et des écosystèmes, dont font partie les sols. Cependant, la contribution des sols aux services écosystémiques n'est souvent pas reconnue (Dominati et al., 2010).

Pour s'en convaincre, on peut prendre l'exemple des services écosystémiques liés à l'eau, et donc *a priori* en partie au sol. Dans Hackbart et al. (2017), une revue de l'évaluation de ces services est réalisée. Le mot sol n'apparaît qu'une fois dans l'article, et par pour parler de sa contribution aux différents services. Grizzetti et al. (2016) proposent un cadre d'étude des services liés à l'eau dans le cadre de plans de gestion de l'eau. Le sol n'est pas inclus dans ce cadre d'étude, et le mot n'intervient que trois fois dans la publication. Cela montre que le rôle des sols dans le cycle de l'eau et la fourniture des services associés n'est pas une évidence dans la littérature dédiée. Plus récemment, Nedkov et al. (2022) ont passé en revue les modèles qui servent à l'évaluation des services de régulation de l'eau. Les plus populaires sont SWAT (Soil and Water Assessment Tool) et InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoff). On peut donc s'intéresser à la prise en compte des sols dans ces modèles répandus.

InVEST est un ensemble de modèles qui permettent l'évaluation de différents services (Natural Capital Project, 2022). Pour les services liés à l'eau (rendement hydrique d'un bassin, mitigation du risque d'inondations, purification), le sol est traité de manière simplifiée, souvent avec un seul paramètre : une classe de conductivité. Méthodologiquement, le sol ne sert qu'à déterminer la quantité d'eau qui s'infiltre ou qui ruisselle. D'après Bagstad et al. (2013), InVEST est un des outils d'évaluation des services écosystémiques les plus aboutis. En regardant la documentation et le fonctionnement des modèles, on voit bien qu'aucune attention particulière n'est accordée aux sols. SWAT est un modèle hydrologique (mécaniste) de bassin versant, qui permet de simuler des transferts d'eau et de molécules ou particules via des écoulements de surface ou souterrains (Neitsch et al., 2011). Ce modèle prend en compte explicitement et de manière détaillée les sols. A la base, ce modèle n'a pas été développé pour évaluer des services écosystémiques. Francesconi et al. (2016) font une revue de son utilisation dans ce cadre. Les plus gros freins identifiés à son utilisation sont le manque de méthodes standardisées pour passer des sorties du modèle à des services écosystémiques, mais surtout la difficulté de prise en main pour des non spécialistes (trouver des données, comprendre le fonctionnement, réaliser la calibration). Ainsi, avec SWAT, il est possible de prendre en compte les sols dans l'évaluation de services écosystémiques. Cependant, les sols ne sont en général pas les éléments de discussion (on peut s'en rendre compte à la lecture de l'article).

En dehors des services écosystémiques, un autre domaine dans lequel les sols pourraient être pris en compte est l'analyse de cycle de vie (LCA pour life cycle

assessment). Cet outil est né dans les années 1960 et permet de quantifier et de comparer les impacts environnementaux de différents produits (Rebitzer et al., 2004). Dans les années 2000, la LCA a été adaptée à l'analyse des impacts environnementaux d'une production agricole : c'est la LCA territoriale (Payraudeau & van der Werf, 2005). Les sols ne sont pas fréquemment considérés dans la LCA territoriale (Garrigues et al., 2012), mais le développement de la discipline représente une véritable opportunité. Les facteurs limitants sont encore une fois la disponibilité des données (Garrigues et al., 2012; Nitschelm et al., 2016) et le manque de méthodes éprouvées (Borghino et al., 2021). On peut tout de même relever la méthode développée par Oberholzer et al. (2012) pour évaluer l'impact des pratiques agricoles sur différents indicateurs de la qualité des sols. Ils n'évaluent pas un état, mais une dynamique de changement d'état.

Cette revue dans des littératures autres que celle des sciences du sol permet de prendre conscience que :

- Il existe des cadres d'études en dehors des sciences du sol qui pourraient permettre de mettre en avant le rôle des sols dans l'environnement et rendre possible leur suivi et leur protection.
- Dans ces domaines, les sols sont rarement pris en compte. Les raisons sont : un manque de connaissances (de culture) sur les sols, un manque de méthodes éprouvées et une difficulté d'accès aux données (ou tout simplement une non-disponibilité de ces données).
- Un cadre conceptuel pour l'étude des sols pourrait rendre la compréhension du fonctionnement du sol et des concepts utilisés en sciences du sol plus aisée pour les chercheurs et acteurs de ces disciplines, et ainsi de faire des ponts entre disciplines.

1-5. Qu'est-ce qu'un cadre conceptuel ?

Un cadre conceptuel vise à fixer les points de repère nécessaires à l'étude d'un sujet. C'est un ensemble de concepts, de notions bien définies et reliées entre-elles, qui fournit les outils de réflexion nécessaires pour aborder les questions relatives au sujet d'étude. Les personnes impliquées dans l'élaboration d'une méthode d'évaluation et de son application gagnent à se référer et à communiquer dans un même cadre conceptuel, car elles s'assurent ainsi de se comprendre mutuellement. Le but d'un cadre conceptuel est donc de présenter une vision claire du sujet, qui permette :

- De comprendre les approches méthodologiques (ou conceptuelles) mises en œuvre dans une publication, c'est-à-dire fournir des clés de lecture à une personne étrangère de la littérature en question.
- De discuter de la pertinence de ces approches compte tenu des objectifs avancés : la méthode est-elle en accord avec les concepts fondamentaux ?
- De monter une méthode : déterminer la quantité que l'on souhaite évaluer, les hypothèses simplificatrices, les facteurs à prendre en compte, etc.

En général, l'élaboration d'une méthode d'évaluation des sols implique de faire des concessions sur la représentation du sol pour arriver à un résultat avec les données et les moyens disponibles. Dans notre cadre conceptuel, on ne parle pas de méthodologie ou de faisabilité de la quantification. Un cadre conceptuel n'est pas un cadre méthodologique. Cela permet de définir le plus justement possible les différents concepts soutenant la réflexion, sans être limité par ces considérations méthodologiques. Cela ne fait pas disparaître la difficulté méthodologique de l'évaluation

des fonctions du sol, mais au contraire met en lumière ces difficultés, qui naissent de la confrontation du cadre théorique aux données et aux connaissances dont on dispose.

1-6. *Quels sont les besoins auxquels ce cadre conceptuel doit répondre ?*

Dans la littérature, on a pu identifier un certain nombre d'objectifs ou de finalités avancés (explicitement ou non, il faut alors les déduire de la méthode employée) par les auteurs dans leurs efforts d'évaluation des sols. Ils peuvent être résumés comme suit :

1. Quantifier et évaluer les services fournis ou les fonctions remplies par les sols dans leurs usages actuels ou dans des scénarios d'usage (Jónsson & Davíðsdóttir, 2016; Choquet et al., 2021; Ellili-Bargaoui et al., 2021).
2. Quantifier et évaluer une « capacité » ou une « aptitude » des sols à remplir des fonctions, pour les usages actuels et des scénarios d'usage (Danner et al., 2003; Greiner et al., 2018; Jost et al., 2021).
3. Evaluer l' « aptitude » des sols à un usage (Bock et al., 2018; Mueller et al., 2007; Rabot et al., 2022).
4. Evaluer les risques de dégradation du sol liés à un usage ou le niveau de dégradation du sol (Oberholzer et al., 2012; European Environment Agency, 2023).
5. Fournir des outils d'évaluation pour les agriculteurs et leurs conseillers qui proposent des mesures d'amélioration pour une gestion durable (Moebius-Clune et al., 2016; Debeljak et al., 2019).

Tous ces objectifs concernent des utilisateurs et des échelles spatiales différentes. Le cadre conceptuel doit donc être assez flexible pour pouvoir englober ces différents objectifs et donner les concepts pour l'évaluation des quantités concernées.

1-7. *Objectifs du stage*

Le stage a été consacré à l'élaboration d'un cadre conceptuel (Partie 3-) qui répond aux exigences mentionnées en 1-6. Cela a été motivé par les constats présentés dans les parties 1-2, 1-3 et 1-4.

A l'aide de ce cadre conceptuel, nous avons réalisé une revue systématique de la littérature sur l'évaluation des sols (Partie 4-), qui nous a permis d'identifier des manques et des difficultés méthodologiques. Pour cette revue, le processus de sélection des articles a été mené à bout. Cependant, par manque de temps, nous n'avons pas pu revoir la totalité des publications sélectionnées.

Enfin, pour illustrer notre cadre conceptuel et le processus d'élaboration d'une méthodologie que nous défendons, un exemple d'application a été élaboré (Partie 5-). Nous sommes partis d'une question de recherche qu'un acteur du territoire pourrait se poser : la détermination du meilleur sol pour un usage viticole. A l'aide du cadre conceptuel, nous avons monté une méthode d'évaluation du sol spécifique à cette question, et nous avons réalisé l'évaluation pour deux sols avec des données provenant du bassin versant du Rieutort dans l'Hérault. Cette partie vise essentiellement à illustrer différentes étapes méthodologiques dans l'élaboration d'une méthode d'évaluation des sols, elle ne répond à aucun besoin réel.

2- Matériels et méthodes

2-1. *Elaboration du cadre conceptuel*

L'élaboration d'un cadre conceptuel a été motivée par le constat de faiblesses méthodologiques dans la littérature. La démarche mise en œuvre est une démarche incrémentale qui suit les étapes suivantes :

- i. Poser et définir un ensemble de concepts et les liens entre ces concepts. Cela passe également par la réalisation de figures pour illustrer ces concepts.
- ii. Positionnement du cadre conceptuel dans la littérature : quelle plus-value, quelles similitudes et différences avec des concepts existants.
- iii. Partage et discussion autour du cadre conceptuel, d'abord avec les encadrants de stage, puis, pour la version la plus aboutie, avec l'ensemble du laboratoire lors d'une journée de présentation des stagiaires, lors de la conférence sur la sécurité des sols (Soil Security Conference à Séoul en juin 2023), où Alexandre Wadoux a présenté le cadre à la session 10, Soil Security and Water and Environmental Security, et enfin à Alain Brauman de l'UMR Eco&Sols le 19/07.
- iv. Suite à ces discussions : raffinement du cadre conceptuel, ajout et modifications de définitions, précision par des exemples. Identification des lacunes.
- v. (Si les lacunes sont trop importantes : correction du cadre conceptuel et retour à la première étape).

Avec cette démarche incrémentale, trois cadres conceptuels ont été proposés et travaillés, augmentant en complexité (et en ambition) avec l'expérience, le nombre de lectures, et le niveau de compréhension et d'appropriation de ces lectures. Pour l'élaboration du cadre conceptuel, la sélection des publications n'a pas suivi de méthodologie particulière. La bibliographie a été constituée et s'est étendue par des suggestions de mes différents interlocuteurs, des recherches spécifiques sur les bases de données (Web Of Science essentiellement) et en suivant les références des publications connues lorsque cela semblait pertinent.

2-2. *Revue de la littérature*

Le cadre conceptuel répond au besoin de faire le lien entre les utilisations potentielles d'une évaluation des sols et les méthodes d'évaluation des sols. En particulier, il ne nous semblait pas toujours évident de savoir quelle était exactement la quantité quantifiée par les méthodes existantes, et si ces quantités permettaient effectivement de répondre aux besoins avancés par les différents auteurs.

Pour montrer la pertinence de notre démarche et de notre cadre conceptuel, une revue de la littérature a été réalisée, qui vise à distinguer les différents types de méthodes disponibles et ce qu'elles permettent d'évaluer selon notre cadre conceptuel. On cherche à sélectionner les articles qui tentent d'évaluer les sols dans leur globalité (et pas un aspect précis), et dans une volonté d'apporter des informations pour aider à la décision.

Pour cela, différentes recherches ont été réalisées sur le Web Of Science entre le 31/07/2023 et le 03/08/2023. La phrase de recherche « Soil (Title) AND (Eval* OR Assess* OR Quantif* (Title) » a été combinée avec les mots clés *fonction*, service, quality, et health (fonction, service, qualité et santé et français). En tout, cela a mené à environ 750 résultats de recherche. Pour tous ces articles, le titre, éventuellement le

résumé et la partie matériel et méthodes ont été lus, pour ne retenir que les articles qui remplissent les critères suivants :

- Évaluent les sols, peu importe la méthode (quantifications de fonctions, ou d'« indicateurs de qualité », etc).
- Réalisent plus qu'une simple comparaison de propriétés des sols. Les méthodes qui se basent sur des propriétés sans faire de lien avec des fonctions des sols doivent avoir par exemple une étape de scorage des propriétés des sols.
- Évaluent plusieurs fonctions à la fois, et si les fonctions ne sont pas la notion de base, utilisent une diversité d'indicateurs (pas seulement physique, chimique ou biologique). Cela permet d'éviter les publications qui sont centrées sur le développement d'un indicateur en particulier.
- Ne concernent pas des sols urbains. Ces sols ayant des propriétés et des fonctionnements propres (par exemple caractérisés par une horizonation qui peut évoluer rapidement, ou alors avec des valeurs extrêmes de concentrations), on ne tente pas de raccrocher leurs méthodes d'évaluation à notre cadre conceptuel.
- Ne concernent pas les sols pollués ou recomposés, pour les mêmes raisons que celles citées précédemment. Cela concerne essentiellement les sols qui se situent sur d'anciens sites industriels.

Cette recherche a permis de sélectionner 110 publications, dont la liste complète est donnée en Annexe 2. 11 publications ont été écartées d'entrée, lorsqu'une lecture plus approfondie a révélé une non-conformité aux critères de sélection. Pour réduire le nombre de publications à lire et à classer dans le cadre conceptuel, nous avons décidé de faire une sélection supplémentaire. En effet, parmi les 99 publications restantes, un grand nombre ont été identifiées d'entrée comme s'appuyant sur la même méthode, celle préconisée dans les publications sur la qualité de sols des années 1990 (Doran & Parkin, 1994, 1996; Karlen et al., 1997; Seybold et al., 1997). Il s'agit en général de cas d'étude pour un usage en particulier, et la méthode consiste à mesurer un grand nombre d'indicateurs, puis à sélectionner un ensemble de données minimum (Minimum Dataset) par des méthodes statistiques, et à construire des fonctions scores qui transforment les valeurs des indicateurs en scores, et enfin à agréger les différents scores en un score unique. En tout, cela concerne 38 publications, plus d'un tiers du total, qui ont été écartés de la revue systématique (mais pas de la discussion). Ensuite, parmi les publications restantes, 18 utilisent des outils d'évaluation développés dans d'autres papiers. En particulier, 12 (une publication sur dix) utilisent le Soil Management Assessment Framework (Andrews et al., 2004). Ces publications n'ont donc pas été revues (les outils en question sont compris dans la revue ou y ont été inclus). Enfin, nous n'avons pas eu accès à 4 articles, qui n'ont pas pu être traités.

Au total, 39 articles ont donc été sélectionnés par cette méthode de recherche sur le Web Of Science. La revue consiste à lire ces articles pour pouvoir remplir le tableau de revue (Tableau 2), construit comme une grille de lecture pour comprendre la méthode employée par les auteurs grâce au cadre conceptuel. Le choix des colonnes sera plus détaillé dans la partie résultats, après avoir introduit le cadre conceptuel.

Ces 39 articles ont été complétés pour la revue avec des publications de la « littérature grise », publiées par des états ou différents organismes (5 en tout), en général sous la forme de rapports, ainsi qu'un article qui n'est pas encore référencée sur le Web Of Science et 2 publications de notre connaissance non obtenue via la recherche, un sur l'outil d'évaluation des sols canadien (Bock et al., 2018) et un sur une des fonctions quantifiées dans le Soil Navigator (Sandén et al., 2019). Nous avons décidé

d'inclure ces publications, car elles nous ont servis pour la réalisation du cadre conceptuel, remplissent les critères de la recherche, complètent les publications sélectionnées, ou proposent une bonne diversité de méthodes qui illustrent différentes notions du cadre conceptuel. La liste des 47 publications est donnée en annexe 2.

La revue bibliographique est un travail qui demande beaucoup de temps, et par conséquent, il n'a pas pu être mené à son terme à l'issue du stage. On s'est concentré pour celui-ci sur les publications que nous connaissions déjà bien ou qui nous ont semblé les plus importantes (niveau d'élaboration de la méthode ou de l'outil, réflexion sur les usages possibles de l'outil). Il est cependant prévu de mener à terme cette revue dans une perspective de publication dans un journal scientifique.

2-3. Exemple d'application : présentation du modèle

La revue bibliographique permet de montrer comment le cadre conceptuel peut servir de grille de lecture pour aborder la littérature sur l'évaluation, et d'identifier des manques méthodologiques. Il reste donc à illustrer comment le cadre conceptuel peut servir à mettre en place une méthode d'évaluation des sols cohérente avec les besoins d'un commanditaire. C'est le but de l'exemple d'application.

Pour cet exemple, on se place dans un scénario hypothétique, qui sera explicité dans la partie dédiée (Partie 5-). Pour mener la quantification à bout, nous avons eu besoin de réaliser un bilan hydrique d'une parcelle de vigne, ce qui implique de sélectionner à la fois des parcelles à modéliser et un modèle adapté au contexte. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur la thèse d'Audrey Naulleau (Naulleau, 2021), qui a utilisé le modèle WaLIS (Water baLance for Intercropped Systems) (Celette et al., 2010, voir annexe 3) sur 10 parcelles expérimentales du bassin versant du Rieutort (Hérault). Les données étaient donc déjà disponibles, notamment les réservoirs utiles des différentes parcelles, les stades phénologiques de la vigne (débourrement) et les itinéraires techniques pour les années 2018-2020. Ce sont donc ces données qui ont été utilisées dans l'exemple d'application.

Le modèle WaLIS simule l'évolution (en 1D) de la teneur en eau du sol à pas de temps journalier, en fonction des besoins en eau de la vigne et de la consommation de l'enherbement sur les rangs et les interrangs. Il permet de prendre en compte le développement et la gestion de ce couvert (tonte ou labour). L'eau du sol est répartie en deux compartiments. Le premier est accessible à la vigne et au couvert, alors que le deuxième, situé sous le rang et sous le premier compartiment, n'est accessible qu'à la vigne. La quantité d'eau transpirable totale (TTSW pour total transpirable soil water) est le paramètre utilisé pour décrire le sol, il est ensuite partagé en un TTSW1 et TTSW2 pour chaque compartiment, en fonction de la croissance du couvert. Ce paramètre a été obtenu par modélisation inverse dans Naulleau (2021). Pour plus de précisions sur les équations du modèle, on peut consulter Celette et al. (2010) ainsi que la documentation.

Pour compléter le travail de terrain d'Audrey Naulleau et augmenter notre connaissance sur les sols des parcelles expérimentales, une journée de terrain a été organisée pour réaliser des sondages pédologiques dans ces parcelles. Cela a permis de les rattacher à un référentiel local (Herbreteau, 2021), au référentiel pédologique (Baize & Girard, 2008), et à la World Reference Base (WRB, IUSS Working Group WRB, 2015). La présentation de cette journée et des résultats produits est en dehors de la portée de ce rapport, le rapport de la journée avec la description des sols est montré en annexe 6. Dans le cadre de l'exemple d'application, ce travail a permis de sélectionner deux parcelles assez contrastées (et pas qu'en TTSW), les parcelles 1 et 7, qui seront présentées dans la Partie 5-3.

3- Le cadre conceptuel

Le cadre conceptuel pour l'étude des sols est divisé en trois parties : la représentation du sol (Partie 3-1), les utilisateurs du sol (Partie 3-2), et les concepts pour la quantification (Parties 3-3 et 3-4). La représentation du sol, souvent non précisée dans l'évaluation des sols, permet pourtant de faire le lien entre propriétés, processus, facteurs extérieurs et fonctions du sol. Faire ce lien permet d'appuyer les choix méthodologiques et d'étoffer la discussion autour des résultats obtenus, notamment les limites méthodologiques. De même, définir explicitement les utilisateurs du sol, leurs intérêts et leurs impacts sur les sols ouvre des pistes de discussion et d'interprétation, notamment sur la valeur des résultats produits aux yeux des personnes concernées par l'évaluation. Par exemple, si le but d'une évaluation est de fournir de l'information à des décideurs, est-ce que l'information produite est vraiment en mesure de les assister dans les processus de décision ? Enfin, les concepts pour la quantification permettent de mettre en évidence différents aspects possibles d'une évaluation des sols. Lors de l'élaboration d'une méthodologie, il est nécessaire de bien identifier l'aspect du sol que l'on souhaite évaluer, en lien avec l'objectif et les moyens de l'étude. L'ensemble de définitions du cadre conceptuel ont été synthétisées dans le glossaire de l'annexe 1.

3-1. Représentation du sol

Pour évaluer les sols, il est nécessaire d'en comprendre le fonctionnement. Ainsi, le fonctionnement du sol est à la base de la définition de qualité et de santé des sols (Karlen et al., 1997; Bünemann et al., 2018) (« capacité des sols à fonctionner... »). Cette partie répond donc aux questions suivantes : qu'est-ce que le sol ? Comment le sol fonctionne-t-il ? Comment le sol s'inscrit-il dans son environnement ? Le terme « représentation » est utilisé, car il s'agit d'une manière simplificatrice de voir les choses, notamment les interactions entre le sol et l'environnement, et qui introduit des choix dans les définitions adoptées (d'autres choix sont possibles). La Figure 3 récapitule notre représentation du sol dans un milieu naturel.

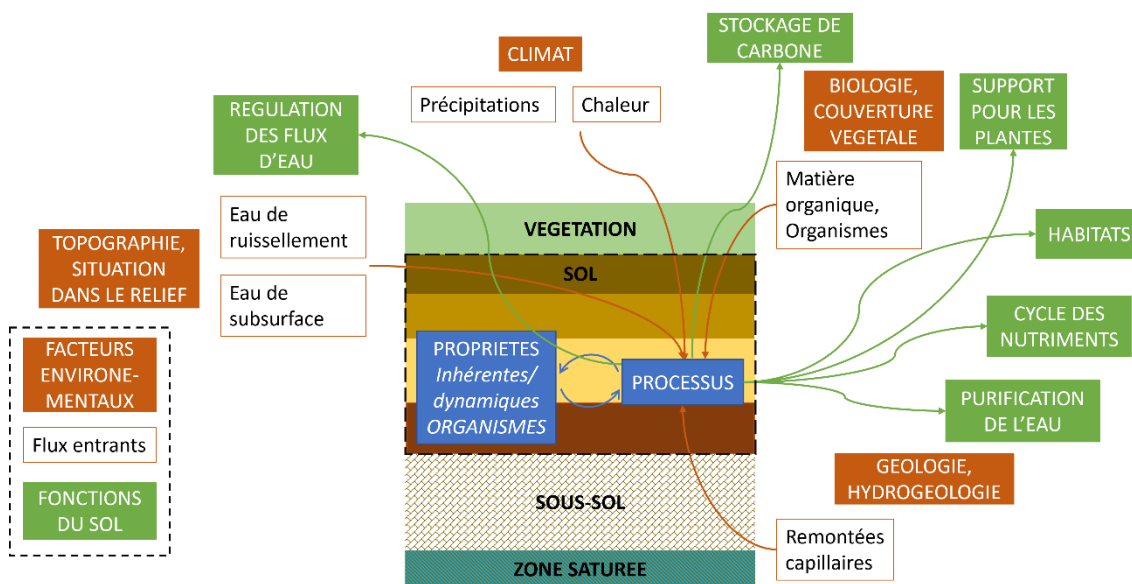


Figure 3 : schéma représentatif des différents éléments qui participent au fonctionnement du sol et à la réalisation de fonctions par les sols

Avant tout, il faut définir le sol. On adopte un point de vue de pédologue : le sol est considéré comme une succession d'horizons qui se différencient du matériau parental. Comme précisé dans la définition du Soil Survey Staff (Soil Survey Staff, 1999), le sol est donc composé de solides, de liquides et de gaz. On adopte également l'extension de la définition du sol à tout matériau qui permet de supporter les plantes enracinées, avec une profondeur limite de 2m.

Un sol est décrit par ses propriétés, qui sont des caractéristiques ou des composants du sol qui peuvent être mesurés. La structure du sol, le pH et le nombre de vers de terre sont des propriétés des sols, respectivement physique, chimique et biologique. Avec ces trois exemples, on voit que les propriétés peuvent être de nature différente. Le pH est lié à la concentration de protons dans la solution du sol et peut être déterminé de manière continue, alors que la structure est une caractéristique physique que l'on évalue qualitativement sur la base d'observations de terrain. Le sol se forme par altération d'un (ou plusieurs) matériau parental, les propriétés du sol évoluent donc intrinsèquement. Cependant, toutes ne varient pas sur les mêmes échelles de temps. On appelle les propriétés inhérentes les propriétés qui sont stables à l'échelle d'une vie humaine. Elles découlent généralement de la pédogenèse (texture, composition minéralogie, profondeur de sol). Les autres propriétés sont dites dynamiques, comme la teneur en matière organique, l'infiltrabilité de surface, la biomasse microbienne. On peut encore distinguer, parmi les propriétés dynamiques, deux échelles de temps : certaines propriétés peuvent varier fortement au cours d'une année (biomasse microbienne), et pour d'autres, les variations s'apprécient sur un temps plus long (teneur en matière organique stable).

Un sol s'inscrit dans un environnement : une lithologie (nature de sa roche mère et de ses altérations), une hydrogéologie (présence et proximité d'une nappe), une topographie (pente, situation dans un paysage), une couverture végétale, une organisation de la végétation dans le paysage, et un climat. On appelle facteurs environnementaux les facteurs naturels à l'origine de flux entrants dans les sols, ou conditionnant des flux sortants. Ces flux peuvent être des flux de matière (eau, organisme, matière organique) ou d'énergie (température). L'environnement affecte donc le fonctionnement du sol en conditionnant les flux à la frontière des sols.

Le sol est un milieu de transformations. Les processus sont définis comme les mécanismes et les actions qui se déroulent dans les sols par interaction entre les différents constituants (eau, phases minérales, air) et les organismes vivants. Par exemple : la circulation de l'eau dans le sol (processus) est contrôlée par la structure, la texture, la caractéristique de rétention des différents horizons (propriétés), le prélèvement par les plantes et les organismes (autres processus), mais aussi par le climat, la distance à la zone saturée et la conductivité du substrat (facteurs environnementaux). Les processus des sols peuvent modifier les propriétés des sols et être à l'origine de flux sortants du sol. Les processus contrôlent donc la dynamique d'évolution des propriétés du sol.

Un des moteurs du fonctionnement du sol sont les organismes du sol (Creamer et al., 2022). Ils interviennent dans un grand nombre de processus, qui ne seraient parfois pas possibles sans eux. Notamment, de nombreuses transformations chimiques et physiques des sols ont lieu via ces organismes, comme l'augmentation de la macroporosité par le creusement de galeries de vers de terre, ou alors les différentes étapes de dégradation et de minéralisation de molécules organiques.

On appelle fonction du sol le résultat des processus des sols, ou encore ce que fait le sol indépendamment de tout intérêt humain (Seybold et al., 1997; Rabot et al., 2018; Calvaruso et al., 2021). Les fonctions sont donc des flux ou des conséquences

qui résultent des processus. Par exemple, l'eau des précipitations s'infiltré dans le sol (processus), une partie pourrait éventuellement quitter le sol et continuer de s'infiltrer vers la profondeur puis rejoindre une nappe. La fonction associée est donc la recharge des nappes, qui est le flux d'eau qui quitte le sol. Une partie de l'eau du sol peut aussi être captée par les plantes au niveau des racines (processus) et sera ensuite transpirée dans les stomates. La fonction associée est la nutrition en eau des plantes, qui est le flux d'eau qui passe du sol à la plante (puis à l'atmosphère). Si les conditions sont adéquates, une population d'organisme peut croître et se maintenir dans le sol (processus de reproduction). La fonction associée est la fourniture d'habitats pour ces organismes par le sol, qui est la quantité de naissances ou le niveau de renouvellement de la population.

Les sols réalisent de nombreuses fonctions, que l'on peut rassembler en différentes catégories de fonctions. Le phrasé exact dépend des auteurs, mais on en retrouve en général 5 :

- *Support pour les plantes ou productivité primaire* : sans sol pour permettre l'établissement des racines, retenir de l'eau et des nutriments, les écosystèmes terrestres seraient peu productifs.
- *Purification et régulation de l'eau ou participation au cycle de l'eau* : l'eau transite par les sols avant de rejoindre les nappes souterraines ou les eaux de surface, ce passage permet sa filtration et sa purification. L'infiltration de l'eau de pluie dans les sols permet également de limiter le ruissellement en surface et les dégâts potentiels (inondations, ruissellement).
- *Cycle des nutriments* : le sol est le lieu de vie de nombreux organismes qui sont des acteurs essentiels du cycle de l'azote, du phosphore et de nombreux autres nutriments.
- *Stockage du carbone et mitigation du climat* : le sol est un compartiment essentiel du cycle du carbone et, dans certaines conditions, peut permettre de stocker durablement du CO₂, ce qui permettrait d'atténuer les effets du changement climatique.
- *Fourniture d'habitats* : le sol est un lieu de vie pour de nombreux organismes, qui sont à la base de nombreux processus.

Les processus et les fonctions n'ont pas une définition absolue. On peut décomposer certains processus en des combinaisons d'autres processus « élémentaires ». Ainsi, le processus de minéralisation d'une molécule organique peut nécessiter différents processus ou mécanismes microbiens : passage de la molécule organique à l'intérieur de la cellule, puis transformations chimiques successives par différentes enzymes et enfin rejet de CO₂. De même, la fonction de productivité primaire est réalisée grâce aux fonctions de création d'eau verte et de nutrition des plantes par le sol. La fonction de création d'eau verte intervient également dans la fonction de régulation de l'eau. On peut aussi avoir une ambiguïté dans la séparation entre un processus et une fonction. Par exemple, la minéralisation de la matière organique peut être vue comme un processus ou une fonction.

Les dynamiques des propriétés du sol et des facteurs environnementaux qui l'impactent impliquent que les niveaux de réalisation des fonctions du sol varient dans le temps. Par exemple, les plantes n'ont pas les mêmes besoins en eau dans l'année, et la quantité d'eau dans le sol ne permet pas toujours de couvrir ces besoins. Le niveau de la fonction de nutrition en eau des plantes varie donc également dans l'année.

Cet aspect dynamique représente à la fois une opportunité et un risque pour les utilisateurs du sol : l'opportunité d'augmenter la réalisation d'une fonction d'intérêt, et le

risque de diminuer la réalisation d'autres fonctions moins intéressantes mais vitales, éventuellement irréversiblement. Dans tous les cas, le sol est multifonctionnel, c'est-à-dire qu'il remplit simultanément différentes fonctions, même lorsque l'intérêt premier d'un utilisateur (et ses efforts de gestion) est centré sur un ensemble réduit de fonctions. Cela implique que l'individu qui gère le sol pour ses intérêts n'est potentiellement pas le seul à bénéficier des fonctions que le sol réalise, et que sa gestion du sol peut mener à une baisse du niveau de réalisation de certaines fonctions au détriment d'autres bénéficiaires.

3-2. Les utilisateurs du sol : intérêts et impacts

La représentation du sol et de son fonctionnement (Figure 3) permettent de comprendre comment les sols réagissent à des flux entrants déterminés par des facteurs environnementaux et comment ils réalisent des fonctions, indépendamment de tout intérêt humain. Cependant, les humains ont un intérêt dans la réalisation de fonctions par le sol, et peuvent largement impacter les propriétés et les facteurs environnementaux (flux entrants) dans l'objectif de maximiser la réalisation des fonctions d'intérêt. Pour étudier les fonctions du sol, il faut donc prendre en compte les utilisateurs (humains) du sol.

Le commanditaire de l'évaluation est la personne qui souhaite réaliser une évaluation, ou à qui l'évaluation est adressée. Il n'est pas forcément nommé explicitement, cela peut être par exemple « les décideurs ». Le commanditaire n'est pas forcément la personne qui agit directement sur les sols (celui que l'on nomme « utilisateur » par la suite, leurs intérêts ne sont pas forcément les mêmes).

L'intérêt des différents utilisateurs peut être exprimé en termes de services écosystémiques, définis comme les bénéfices que l'on obtient des écosystèmes (Costanza et al., 1996). Ainsi, le sol remplit des fonctions et les services écosystémiques sont les bénéfices que l'on peut en tirer. Par exemple, le sol peut retenir et dégrader des molécules organiques (fonction), ce qui permet de réduire les concentrations en pesticides dans les eaux souterraines (service, auquel on peut donner une valeur). Ou encore : le sol permet d'infiltrer et de stocker de l'eau de pluie (fonctions), ce qui limite les risques d'inondations en cas de précipitations intenses (service). La différence entre fonction et service provient donc de la formulation d'un intérêt humain dans la réalisation de fonctions. Cette différence n'est pas toujours explicite ni facile à faire.

Tout le monde bénéficie de services fournis par les sols, et on peut associer des bénéfices à toutes les fonctions du sol. Les bénéfices d'une production de nourriture ou de la purification de l'eau sont évidents. La régulation des flux d'eau permet de limiter les risques d'inondations, la charge en sédiments des rivières. Le stockage de carbone permet d'atténuer le réchauffement climatique. Enfin, la fourniture d'habitats permet d'héberger des microorganismes qui constituent un stock de gènes pour la recherche pharmaceutique (European Commission, 2002), ou d'héberger des espèces rares d'intérêt culturel, des auxiliaires des cultures, etc.

Certains bénéfices sont directs, d'autres indirects (Tibi & Therond, 2018) : un agriculteur bénéficie directement du prix de revient de sa production (qu'il doit en partie au sol), et les utilisateurs d'un réseau d'eau bénéficient indirectement de la purification de l'eau par les sols (coût évité de traitement). Parmi les bénéficiaires des services fournis par les sols, tous n'ont pas un impact direct sur le fonctionnement du sol. On appelle les acteurs du territoire les individus qui gèrent le sol à différentes échelles, c'est-à-dire dont les décisions et actions impactent les flux entrants et sortants et les propriétés des sols et de leur environnement (directement ou indirectement). Ces acteurs pensent

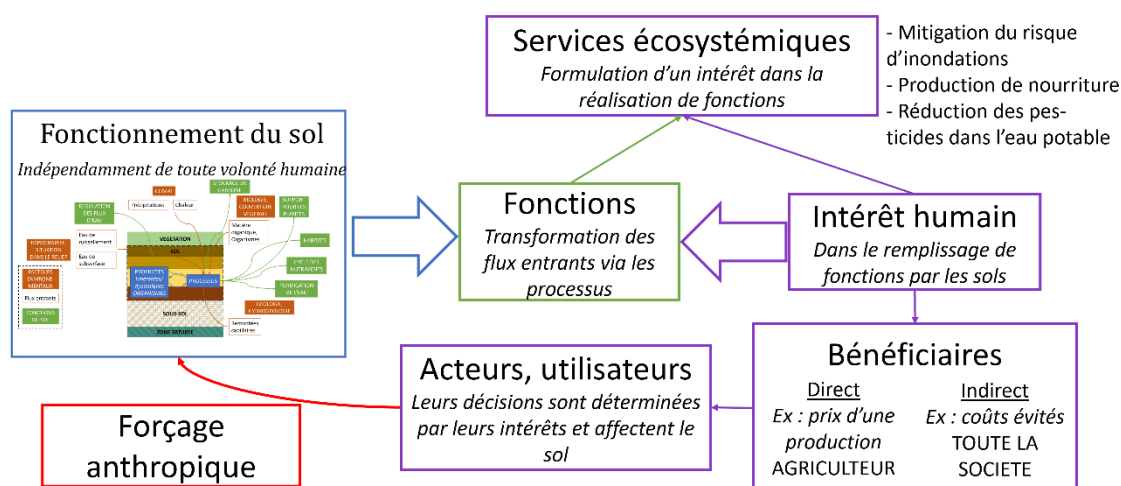


Figure 4 : lien entre les fonctions du sol, l'intérêt humain, acteurs et forçage anthropique.

en termes de services écosystémiques et non de fonctions des sols. Ils sont à l'origine d'un forçage anthropique. Parmi ces acteurs, on appelle utilisateurs du sol ceux qui ont un impact direct sur le sol (typiquement les agriculteurs). Cela est résumé sur la Figure 4 .

Les acteurs en première ligne de la gestion des sols sont les agriculteurs, car ils décident de la couverture du sol et des pratiques culturales dans l'objectif principal de sécuriser et maximiser une production agricole (quantité, qualité). On nomme facteurs anthropiques toutes les interventions humaines sur les sols. Dans le but d'obtention des services, les agriculteurs choisissent un usage du sol : culture pérenne, culture annuelle, prairie, jachère, pâturage, succession de ces usages, etc. L'usage détermine en partie la couverture du sol, qui joue un rôle important dans les conditions en surface du sol et dans la disponibilité des ressources (eau, nutriments, matière organique). Les pratiques agricoles peuvent impacter les flux entrants (de matière organique, d'eau, de molécules fertilisantes, de pesticides, d'éléments traces, de chaleur), les propriétés des sols

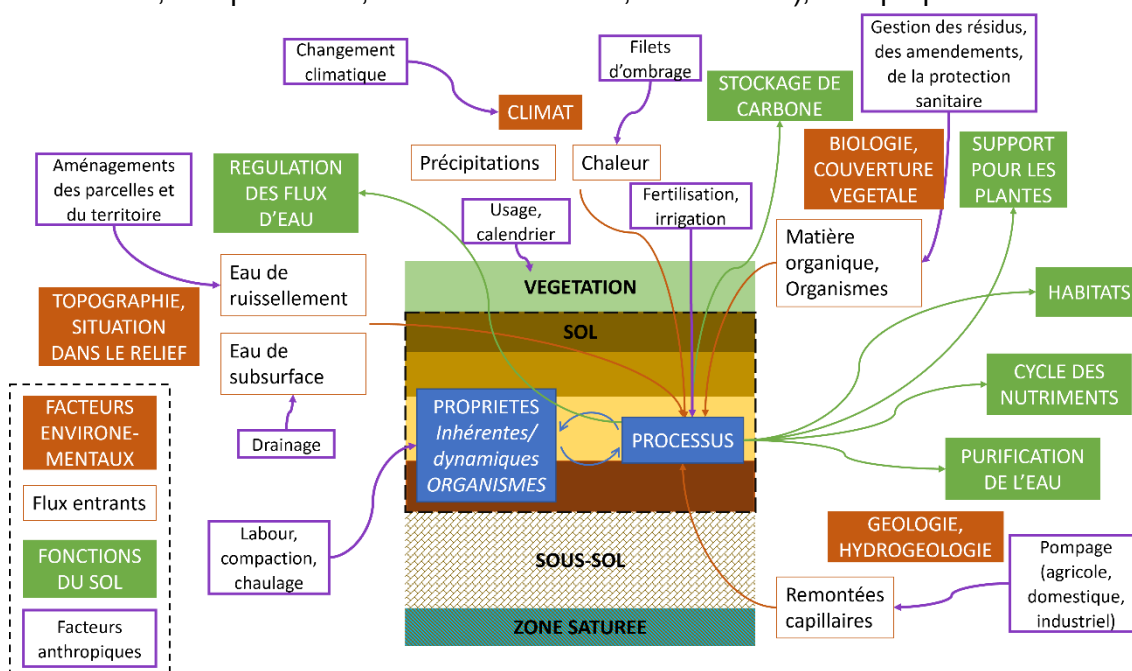


Figure 5 : schéma illustratif de l'impact des facteurs anthropiques sur le fonctionnement du sol.

(infiltrabilité et structure de surface par le labour, densité apparente, pH), voire même certains facteurs environnementaux (pente, eau ruisselante par des aménagements comme les haies ou les fossés, potentiel matriciel à la base du sol par le drainage). Ces pratiques sont implémentées pour augmenter une fourniture de services, voire de pallier l'absence de fourniture d'un service par un sol (irrigation sous serre).

Sur la Figure 5, différents facteurs anthropiques sont présentés, ainsi que leurs impacts sur les facteurs environnementaux, les propriétés et les processus des sols. C'est le forçage anthropique sur les sols. Les propriétés des sols peuvent être modifiées indirectement par les facteurs anthropiques via la boucle de rétroaction entre les propriétés et les processus. On peut aussi noter que l'action anthropique peut impacter des propriétés ou des facteurs environnementaux considérées comme inhérents dans un contexte naturel : profondeur du sol (érosion, défonçage), pente (culture en terrasses), voire même texture (Montagne et al., 2013). Enfin, les acteurs du territoire ne maîtrisent pas tous les facteurs anthropiques. C'est en particulier le cas pour le réchauffement climatique, qui est là indépendamment des pratiques mises en place par un agriculteur.

Enfin, la Figure 6 illustre les liens entre les intérêts de l'utilisateur, les services que l'on cherche à obtenir (et leur quantité), le forçage anthropique, et les fonctions du sol à la base de ces services.



Figure 6 : schéma illustratif de la démarche pour relier les intérêts des utilisateurs aux fonctions contribuant à ces intérêts.

3-3. Concepts pour la quantification : niveau de réalisation, capacité, potentiel

On a vu que la réalisation de fonctions résulte de processus contrôlés par les propriétés des sols et conditionnés par des facteurs environnementaux. On peut insister sur deux points. D'une part, la réalisation d'une fonction peut se faire au dépend ou en synergie avec une autre fonction. D'autre part, les facteurs anthropiques modifient les propriétés et les flux entrants dans le sol (« conditions aux limites »), ce qui impacte les niveaux de réalisation des différentes fonctions, mais peut aussi modifier le niveau de réalisation des fonctions lorsque l'intervention anthropique cesse.

Les concepts présentés dans cette partie sont le niveau de remplissage d'une fonction, la capacité et le potentiel du sol pour une fonction, illustrés sur la Figure 7. A partir de ces trois notions, on peut aborder différents aspects de l'évaluation des sols, en particulier la compatibilité à un usage et la soutenabilité d'un usage, qui sont présentés dans la partie suivante.

Le niveau de remplissage de la fonction est la quantité de la fonction qui est réalisée pendant une durée donnée. Il est déterminé par la réalisation des processus sous-jacents, qui dépendent eux-mêmes des propriétés et des facteurs extérieurs,

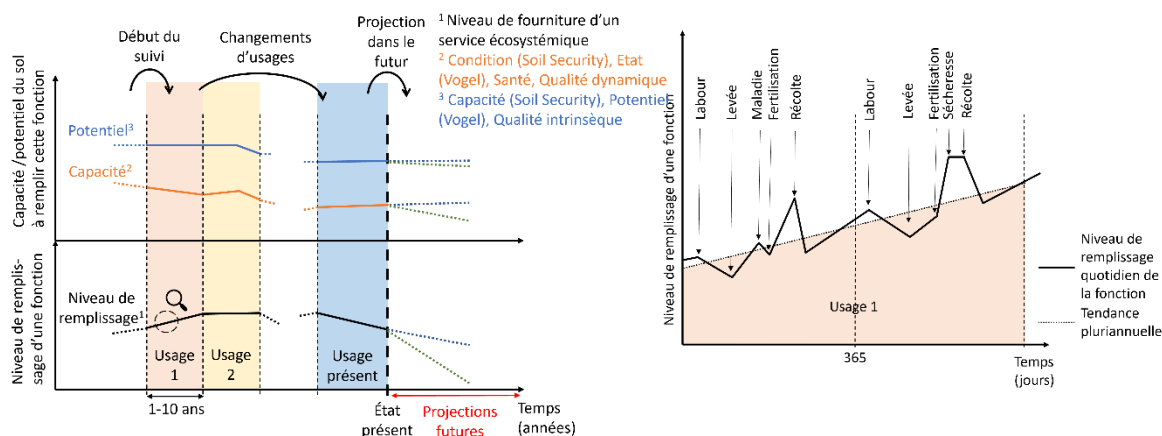


Figure 7 : illustration des 3 concepts de base pour la quantification dans l'exemple d'une succession d'usage (gauche), et zoom sur le niveau de remplissage instantané d'une fonction (droite). Les indices renvoient aux concepts équivalents dans la littérature. Pour plus d'information sur ces correspondances, se référer à l'annexe 5.

environnementaux et anthropiques. En général, on évalue des niveaux de remplissage de fonction sur une année, par exemple un rendement, ou une quantité d'eau purifiée.

Cependant, le niveau de remplissage instantané d'une fonction peut varier énormément dans le temps : un labour est un événement ponctuel qui modifie entre-autres l'infiltrabilité du sol. S'il intervient entre deux pluies rapprochées, le niveau de remplissage de la fonction d'infiltration d'eau sera différent pour ces deux pluies. Pour aller plus loin sur l'infiltrabilité de surface, l'état de surface du sol est une propriété qui peut varier de manière cyclique lors des cycles culturaux : labour, formation d'une croûte structurale, puis sédimentaire, puis destruction de la croûte lors de la levée et du développement du couvert (Pare et al., 2011). L'infiltrabilité de surface sera donc cyclique, et les fonctions liées à l'infiltration d'eau varieront en conséquence dans l'année. Cela est illustré sur le zoom de la Figure 7. En moyenne et sur le long terme, à usage et pratiques fixes, on peut envisager ou non une évolution lente des propriétés et donc du niveau de réalisation des fonctions.

Les niveaux de remplissage des fonctions sont fortement dépendants de l'usage du sol (type de couverture, pratiques et temporalité des pratiques) et des facteurs environnementaux, en premier lieu le climat. Cela implique qu'une mesure de propriétés à un seul instant ne peut pas renseigner sur le niveau de remplissage d'une fonction. Les indicateurs de niveaux de remplissage des fonctions portent sur des flux, ou des différences de stock. Un niveau de remplissage ne permet pas de répondre à tous les besoins possibles de l'évaluation des sols listés en introduction (Partie 1-6). En particulier, cela ne permet pas de savoir si le sol est dégradé et quel est le niveau de dégradation. Intuitivement (le terme dégradé n'est pas encore défini à ce stade), un sol dégradé peut avoir un haut niveau de remplissage de certaines fonctions rendu possible par des pratiques agricoles intenses (dans le cadre de Dominati et al., 2010, on dirait qu'il y a un haut niveau de capital ajouté).

Pour cela, on introduit la notion de capacité du sol. Par-là, on entend la capacité du sol à remplir une fonction indépendamment de son usage, qui est déterminée par ses propriétés et son environnement. Par exemple, peu importe l'usage, on peut attendre d'un sol avec un grand réservoir utile et un climat pluvieux de pouvoir stocker de l'eau et la transmettre aux plantes. On peut faire quelques remarques :

- La capacité est abstraite, elle n'est pas définie pour un usage et ne dépend pas de l'usage du sol, ni des facteurs anthropiques. Nécessairement, elle ne

correspond donc pas à une réalité que l'on peut observer et mesurer sur le terrain. On peut l'estimer uniquement à partir des propriétés du sol, des caractéristiques de son environnement (type de climat, distance moyenne à la nappe, etc), et de la connaissance que l'on a du lien entre ces caractéristiques et les processus à la base des fonctions du sol.

- Une capacité n'est pas forcément liée à un niveau de remplissage d'une fonction. En effet, les pratiques de gestion et la variabilité intrinsèque de certains facteurs environnementaux peuvent mener à un niveau de réalisation de la fonction inattendu compte tenu de la capacité du sol. Capacité et niveau de remplissage d'une fonction sont donc deux informations d'ordre différent, et complémentaires.
- Ce qui est capturé par la capacité, c'est que les sols sont différents et n'ont pas la même potentialité vis-à-vis des différentes fonctions.

La capacité du sol dépend de propriétés dynamiques et évolue donc dans le temps avec ces propriétés. Pour reprendre l'exemple précédent, un labour modifie les propriétés de surface du sol, la capacité du sol à remplir les fonctions qui font intervenir ces propriétés est donc modifiée radicalement de manière ponctuelle. Cependant, on peut considérer que la capacité varie avec la tendance d'évolution de long terme des propriétés dynamiques (on n'est pas obligé de considérer une capacité instantanée, qui prendrait compte de l'état de surface, ou d'autres propriétés qui évoluent cycliquement sur une année).

On a vu que certaines propriétés des sols évoluent sur des temps très longs. On peut donc définir le potentiel du sol pour une fonction, comme étant une composante intrinsèque de la capacité du sol, qui ne dépend que de propriétés inhérentes et de caractéristiques environnementales stables à l'échelle de temps d'une vie humaine. Les remarques sur la capacité s'appliquent également au potentiel. Pour deux sols, celui qui a le plus grand potentiel pour une fonction peut également avoir la capacité la plus faible, et un niveau de remplissage inférieur.

La définition d'un potentiel implique qu'il existe un état optimal pour les propriétés dynamiques du sol. On peut alors voir le potentiel pour une fonction comme une maximisation de la capacité du sol pour cette fonction. Cependant, rien ne garantit que cet état optimal des propriétés des sols soit atteignable et soutenable bio-physiquement (il peut ne pas exister d'usages et de pratiques qui permettent aux propriétés du sol de prendre les valeurs optimales). On aurait pu définir cet état optimal par rapport à un usage ou un sol de référence, mais alors cet usage reste à définir. Dans notre cadre conceptuel, nous ne définissons pas le potentiel ainsi, mais cela peut être une approche méthodologique intéressante (et surtout concrète) pour évaluer un potentiel comme c'est le cas dans le cadre de la sécurité des sols (Evangelista et al., 2023).

Tableau 1 : tableau récapitulatif des propriétés et caractéristiques de l'environnement qui impactent le niveau de remplissage, la capacité et le potentiel d'une fonction.

Quantité	Impactée par
Niveau de remplissage d'une fonction (flux sortants ou conséquences des processus)	-Propriétés du sol -Flux entrants
Capacité (à remplir une fonction)	-Propriétés du sol -Caractéristiques de l'environnement
Potentiel (du sol pour une fonction)	-Propriétés inhérentes -Caractéristiques stables de l'environnement

Le Tableau 1 résume les types de propriétés du sol et de l'environnement à prendre en compte dans l'évaluation des trois quantités présentées dans cette partie.

3-4. Concepts pour la quantification : dégradation, compatibilité, soutenabilité

On appelle dégradation du sol toute diminution de sa capacité et/ou de son potentiel (pour au moins une fonction). On peut distinguer deux types de dégradation : les dégradations réversibles et les dégradations irréversibles. Les dégradations réversibles sont les diminutions de la capacité à potentiel constant. La nature dynamique du sol peut mener à une amélioration de la capacité et au retour à son niveau initial, voire au dépassement de ce niveau. Les dégradations irréversibles sont celles qui concernent les propriétés inhérentes et mènent à une diminution du potentiel. Cette diminution du potentiel est irréversible naturellement, mais éventuellement réversible moyennant une intervention anthropique massive. Par exemple, le défoncement d'une roche pour augmenter la profondeur du sol mène à une augmentation du potentiel de ce sol (voir les sols sur schistes décrits en annexe 6), mais cela nécessite un fort investissement (de capital ajouté). La dégradation du sol, si elle est réversible, ne l'est que jusqu'à un certain point. Une dégradation de propriétés dynamiques peut impacter l'environnement et à terme le potentiel du sol (dérèglements écologiques, perte de biodiversité).

On peut voir l'écart entre la capacité et le potentiel comme une mesure du niveau de dégradation d'un sol, ou encore comme une marge d'amélioration de la capacité du sol (qui peut aussi passer par une amélioration de son environnement). Augmenter la capacité du sol à remplir une fonction peut paradoxalement passer par une diminution du niveau de remplissage de la fonction (ou d'autres fonctions). Par exemple, l'augmentation de la capacité du sol à produire de la biomasse peut nécessiter une diminution de rendements (et donc de production de biomasse) en changeant les pratiques de fertilisation (la propriété dynamique qui évolue est la teneur en carbone du sol, on augmenterait alors le niveau de remplissage de la fonction de stockage de carbone).

Certains usages du sol (la plupart des usages) résultent nécessairement en une diminution de la capacité du sol. Par exemple, la mise en culture d'une prairie peut mener à une baisse de la teneur en matière organique du sol et à une perte de biomasse microbienne qui diminue la capacité du sol à produire de la biomasse. Vu ainsi, il n'est pas concevable de chercher à empêcher les sols de se dégrader. Il faut plutôt chercher à conserver le sol dans un niveau de dégradation facilement réversible, par exemple par retour à un usage naturel (sans forçage anthropique). De plus, on pourrait imaginer des cas où l'amélioration de la capacité pour certaines fonctions passe par la dégradation de la capacité pour d'autres fonctions. Il est donc nécessaire de réfléchir en termes de multifonctionnalité des sols et de garder en tête les compromis entre les niveaux de remplissage des fonctions mais aussi des capacités à remplir les fonctions.

On dit qu'un usage du sol est soutenable lorsqu'il n'entraîne pas de dégradation du sol. C'est la définition qui a été également adoptée par l'Agence Environnementale Européenne : « Sustainable soil management ensures that (dynamic) soil properties do not decline further » (European Environment Agency, 2023).

Dans la littérature, un ensemble de menaces ont été identifiées, qui sont les causes principales de dégradation du sol (European Commission, 2002; Huber et al., 2008; European Environment Agency, 2023) : l'érosion, la perte de matière organique, la contamination (locale et diffuse), le scellement, la compaction, la perte de biodiversité, la salinisation, les glissements de terrain, auxquelles peuvent s'ajouter l'acidification et la désertification. La perte de matière organique concerne une propriété dynamique et

affecte donc la capacité. Cependant, si cette perte concerne de grandes surfaces et est importante, cela peut modifier totalement les équilibres écologiques et la dégradation peut devenir irréversible. De même, la salinisation est une augmentation de la concentration en sels, et n'affecte donc pas de propriétés inhérentes. Cependant, elle affecte durablement l'environnement (modification des conditions de vie), ce qui impacte en retour le potentiel. L'érosion entraîne une perte de sol et affecte donc ses propriétés inhérentes. La dégradation est irréversible.

Comme précisé plusieurs fois, le sol est multifonctionnel, il réalise simultanément de nombreuses fonctions, mêmes celles qui n'ont pas d'intérêt pour l'utilisateur de ce sol. La soutenabilité d'un usage ne peut donc s'apprécier qu'en prenant en compte toutes les fonctions.

On peut récapituler les notions vues jusqu'à présent à l'aide de la Figure 7. Avant toute intervention anthropique, le sol a des propriétés qui sont stables tout comme la réalisation de la fonction (lorsqu'on se place à des échelles de temps longues). Ensuite, un premier usage est affecté au sol et le niveau de réalisation de la fonction change. La capacité diminue mais le potentiel reste constant : il y a une dégradation réversible (pour cette fonction). On peut zoomer à des échelles de temps infra-annuelle pour voir les variations temporelles de réalisation de la fonction. On passe ensuite à un deuxième usage, ce qui modifie les trajectoires. Au début, le potentiel reste stable et la capacité augmente : le sol s'améliore (pour cette fonction). A un certain point, un événement (climatique, écologique, anthropique) affecte la capacité inhérente qui diminue. Il y a une dégradation et l'usage n'est pas soutenable. Une succession d'usages mène à l'état actuel du sol, caractérisé par une valeur des différentes propriétés, des caractéristiques environnementales, du niveau de remplissage, de la capacité et du potentiel des différentes fonctions. On peut ensuite tenter de se projeter dans le futur et prédire l'évolution de l'état du sol pour différents scénarios d'usage, de pratiques et de climats.

Jusqu'ici, les différents concepts ne font pas intervenir les services recherchés par les acteurs du territoire. Cependant, tous les sols n'ayant pas la même capacité, le niveau de remplissage des fonctions sous différents usages diffèrent en fonction des sols, et il est dans l'intérêt des acteurs du territoire de décider de l'usage en fonction des capacités du sol. On peut d'ailleurs déjà observer que l'usage est très lié aux aptitudes des sols (Bock et al., 2018; Choquet et al., 2021). On appelle compatibilité d'un usage à un sol la satisfaction par les sols d'un ensemble de critères d'aptitudes définis par les acteurs du territoire (les seuils de satisfaction de la Figure 6). Dans la littérature, on trouve en général le terme « aptitude des sols » (Mueller et al., 2007; Rabot et al., 2022). Dans notre cadre, on préfère le terme compatibilité, car il fait appel explicitement à des critères de compatibilités définis par un commanditaire. On peut envisager de juger de cette compatibilité par le potentiel (Rabot et al., 2022), la capacité (Debeljak et al., 2019), ou un niveau de remplissage estimé (pas d'exemple trouvé dans la littérature, voir l'exemple d'application). Par exemple, un sol situé dans une cuvette naturelle et avec une faible conductivité hydraulique (indicateurs de la capacité du sol à l'infiltration d'eau) sera compatible avec un usage en zone humide. Un sol sableux et un sol argileux auront des compatibilités différentes à différentes productions végétales. Ainsi, la compatibilité d'un sol à un usage dépend de critères déterminés par le commanditaire (sur la base des caractéristiques physiologiques des espèces végétales envisagées dans l'usage), ces critères peuvent avoir différents niveaux de détail en fonction de l'objectif du commanditaire : déterminer si le sol est compatible avec un usage agricole en général, ou alors si le sol est compatible à la culture d'une variété précise, par exemple.

4- Résultats : revue bibliographique

4-1. Articles sélectionnés, forme de la revue

La liste des 110 articles sélectionnés sur Web Of Science et l'application des différents critères de sélections supplémentaires sont présentés en annexe 2. Parmi les 47 publications finalement sélectionnées, seules 21 ont pu être revues dans la durée du stage (pour un total de 19 méthodes). La revue bibliographique prend la forme d'un tableau synthétique (Tableau 2) qui permet la comparaison rapide des différentes méthodes. L'enjeu est de sélectionner les critères de comparaison les plus pertinents.

4-2. Sélection des critères de comparaison

Maintenant que le cadre conceptuel a été décrit, on peut sélectionner les critères qui vont nous servir à comparer les publications. Un des objectifs de la revue est de confronter ce que les auteurs annoncent quantifier avec ce qui l'est vraiment dans notre cadre conceptuel. Pour cela, nous avons donc sélectionné pour chaque publication une citation qui nous semble décrire la quantité ou la notion que les auteurs annoncent quantifier. A titre indicatif, on donne le nombre de fonctions quantifiées (ou si aucune fonction n'est quantifiée). Ensuite, une partie importante de la revue est de cerner la méthode décrite dans la publication et de la synthétiser en quelques phrases pour le tableau. Dans cette colonne, le terme indicateur « empirique », repris de Choquet et al. (2021), désigne des indicateurs qui sont obtenus par combinaison de propriétés du sol ou de caractéristiques de l'environnement et sont liés empiriquement aux processus qui résultent en la réalisation des fonctions. Dans les types de méthode identifiées par Greiner et al. (2017), cela correspond aux méthodes statiques. Par exemple, la réserve utile peut servir d'indicateur empirique de la capacité du sol à stocker de l'eau.

Il faut traiter les différentes parties du cadre conceptuel, à commencer par les « utilisateurs » (ici les commanditaires). On a typiquement deux types de publications : celles où le résultat principal est une méthode d'évaluation que l'on peut réutiliser (et alors on l'appelle un outil), et celles où le résultat principal découle de l'évaluation réalisée avec la méthode (celles-ci sont plus pour des besoins de recherche). Dans les deux cas, on détermine si la méthode est prévue pour être réutilisée, ou si la discussion sur les résultats produits fait intervenir un commanditaire (est-ce que l'applicabilité de la méthode est discutée). Ensuite, pour les outils, on détermine si le commanditaire intervient dans l'évaluation (choix des indicateurs utilisés, choix des seuils), ou s'il a juste à appliquer la méthode comme telle. Une méthode qui fait intervenir le commanditaire permet de coller davantage à ses besoins et aux données dont il dispose.

Pour la partie représentation du sol, on regarde d'abord quelle définition du sol est adoptée (profondeur d'évaluation). Ensuite on regarde les composant du cadre conceptuels qui sont pris en compte : quel type de propriétés, de facteurs environnementaux et de facteurs anthropiques.

Enfin, nous donnons la quantité qui, pour nous est quantifiée par les auteurs, sur la base de leur méthodologie. C'est-à-dire : est-ce que les indicateurs se rapportent à un niveau de remplissage des fonctions (un flux), à une capacité, ou à un potentiel. Pour les auteurs qui quantifient plusieurs fonctions, on relève également s'il y a de la consistance entre les fonctions, c'est-à-dire si on évalue la même chose pour ces différentes fonctions. Enfin, on note si les auteurs ont confronté le résultat de la quantification à un usage, c'est-à-dire s'ils ont évalué une compatibilité. On garde une colonne pour donner au lecteur des informations supplémentaires.

4-3. La revue bibliographique

Le Tableau 2 donne toutes les informations de la revue bibliographique. Les articles ne sont pas classés dans un ordre particulier. Les couleurs permettent de donner une meilleure vue d'ensemble du tableau. Comme la revue n'est pas encore complète (21 publications sur 47), les observations réalisées dans la suite de cette partie doivent être prises avec précaution. Deux conclusions restent *a priori* vraies (sur la base de la connaissance des abstracts des articles restants) : la grande majorité des méthodes se basent sur des relations empiriques entre des indicateurs et les fonctions du sol, et par conséquent la capacité est la quantité qui est en général évaluée, niveau de remplissage et potentiel sont plus anecdotiques.

4-4. Les méthodes d'évaluation

On voit que la plupart des publications utilisent des indicateurs empiriques comme décrit au paragraphe précédent. Ces indicateurs ne renseignent sur une capacité ou un potentiel. Ainsi, la plupart des publications revues portent sur une capacité à remplir une fonction (en violet dans le Tableau 2). C'est la technique d'évaluation qui est en apparence la plus simple à réemployer par des commanditaires, car il suffit de calculer des indicateurs à partir de propriétés du sol, en général disponibles dans des bases de données. La difficulté réside plus dans la construction, le choix des indicateurs et dans leur interprétation en relation avec les fonctions du sol et des usages éventuels.

Parmi ces méthodes empiriques, il y a différents types d'approche. Déjà, on peut noter la méthode usuelle des fonctions scores, qui n'a pas été incluse dans la revue finale, mais qui concernait 38 publications sur les 99 retenues des recherches sur Web Of Science. Dans ces publications, les scores portent sur des propriétés et reflètent une « qualité » ou une « santé », souvent mal définis, ou non déclinées en fonctions du sol. De plus, il n'y a pas souvent de méthodologie claire pour la construction des fonctions scores au-delà de la forme donnée (croissante, décroissante, ou croissante puis décroissante et inversement). Parmi les 19 outils revus, quatre utilisent des fonctions scores continues (Andrews et al., 2004; Bock et al., 2018; Moebius-Clune et al., 2016; Thoumazeau, Bessou, Renevier, Panklang, et al., 2019), mais avec des méthodologies différentes à chaque fois. La méthodologie de construction des fonctions scores est claire, et elles portent sur des indicateurs reliés à des fonctions et pas à une « qualité » abstraite. Dans Danner et al. (2003), Mueller et al. (2007), Bechler & Toth (2010;), Oberholzer et al. (2012) Lehmann et al. (2013), Greiner et al. (2018) et Jost et al. (2021), les indicateurs sont également associés à des scores, mais de manière discontinue : ils sont répartis en différentes classes en fonction de leur valeur. D'une manière générale, pour les méthodes qui aboutissent à une cartographie des fonctions, il est commode de transformer les indicateurs en une valeur entre 0 et 1 (Calzolari et al., 2016).

Tableau 2 (pages suivantes) : tableau de revue bibliographique selon les critères définis à partir du cadre conceptuel. On a appliqué un code couleur pour une lecture plus rapide du tableau : vert pour « oui », rouge pour « non », bleu pour « méthode empirique », sable pour « autre type de méthode », jaune pour « évaluation en surface (<30cm) », jaune pour « évaluation sur toute la profondeur », violet pour « capacité », marron pour « potentiel », et gris pour « niveau de remplissage ».

Référence	Titre de la publication	Quantité quantifiée selon les auteurs	Nombre de fonctions quantifiées	Méthode reproductible ? Prise en compte d'un bénéficiaire de l'évaluation dans l'argumentation ?	L'utilisateur intervient-il dans l'évaluation	Description de la méthode)	Profondeur d'évaluation	l'évaluation			compte (pour au moins une fonction)			une fonction)			Confrontation de la quantité quantifiée avec un usage (compatibilité)	Spécificités		
								Propriétés inhérentes	Propriétés dynamiques	Climat	Topographie-paysage	Hydro-Géologie	Couverture du sol (peut aussi être naturelle), usage	Pratiques	Quantité quantifiée	Consistance entre les fonctions				
Andrews et al. 2004	The Soil Management Assessment Framework : a quantitative soil quality evaluation method	"Qualité des sols"	5	Oui	Oui	L'utilisateur, assisté par un modèle de décision, choisit les indicateurs empiriques pour les fonctions à quantifier. Chaque indicateur est transformé en un score de 0 à 1 (fonctions scores à dire d'experts).	Propriétés de surface uniquement (jusque 15 cm), sauf exception (AWC, profondeur du sol)	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui	Capacité	Non (RU renseigne sur une capacité, mais le test P ou le quotient métabolique concernent plutôt un niveau de remplissage)	Oui	Fonctions score, outil d'évaluation fréquemment utilisé dans la littérature.		
Rabot et al. 2022	Development and spatialization of a soil potential multifunctionality index for agriculture (Agri-SPMI) at the regional scale. Case study in the Occitanie region (France)	"Potentiel de Multifonctionnalité"	4	Non	Non	Il y a plusieurs indicateurs empiriques par fonction. Pour chaque indicateur, on a un seuil qui détermine si l'indicateur est limitant ou non pour la fonction. On obtient le nombre de fonctions que le sol peut remplir.	1 m. Pour les propriétés considérées comme dynamique, on ne prend pas en compte les 30 premiers centimètres.	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Potentiel	Oui	Oui	Evaluation d'un potentiel uniquement, confrontation à des usages		
Calzolari et al. 2016	A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale	"8 fonctions qui soutiennent la fourniture potentielle de services écosystémiques sont évaluées", "contribution des sols aux services écosystémiques" (trad.)	8	Non	Non	Choix d'indicateurs empiriques selon l'expertise locale. Pour la cartographie, ils sont ramenés dans l'intervalle 0-1 par une transformation affine.	1m	Il y a plusieurs indicateurs empiriques G4+G5	Oui	Non	Non	Oui (présence d'une nappe à moins de 3 m de profondeur)	Oui	Non	Capacité	Oui	Non			
Choquet et al. 2021 (empirique)	Comparison of empirical and process-based modelling to quantify soil-supported ecosystem services on the Saclay plateau	"Ces relations empiriques capturent la capacité du sol à délivrer un service plus ou moins indépendamment de l'usage et des pratiques"	4	Non	Non	Sélection d'1 indicateur "empirique" par fonction dans la littérature. Lorsque l'indicateur nécessite un renseignement sur les pratiques, on se place dans une situation de référence.	Dépend des fonctions (pour production de biomasse, utilisation du Muencheberg-SQR, donc plus d'1m30 possible)	Oui	Oui	Non (mais les indicateurs sont choisis pour être calibrés pour cette zone pédo-climatique)	Oui	Non	Oui	Oui	Capacité	Niveau de remplissage projeté pour un usage de référence, ce qui constitue une sorte de capacité	Oui	Non (ex : capacité pour la production de biomasse, potentiel pour la régulation du climat)	Non	Comparaison de deux méthodes d'évaluation
Choquet et al. 2021 (modélisation basée sur les processus)	Comparison of empirical and process-based modelling to quantify soil-supported ecosystem services on the Saclay plateau	"potentiellement plus précis que les modèles empiriques et applicables à une variété de services"	4	Non	Non	Modélisation basée sur les processus à l'aide d'un modèle de culture (transferts d'eau, de chaleur et de solutés, dynamique du carbone, croissance végétale). Sélection d'indicateurs parmi les sorties du modèle.	1m	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non/oui	Oui	Capacité	Oui	Non	Utilisation d'un usage de référence dans une modélisation mécaniste.		
Danner et al. 2003	Das Schutzgut Boden in der Planung, Bewertung natürlicher Bodenfunktionen und Umsetzung in Planungs- und Genehmigungsverfahren. La ressource en sol dans la planification : évaluation des fonctions naturelles et mise en œuvre dans la planification et pour la délivrance d'autorisations (trad.).	"Für die Bodenbewertung sind Methoden notwendig, mit denen Bodeninformationen zu einer Wertaussage über den Boden verknüpft werden können" Pour l'évaluation des sols, les méthodes doivent relier les informations dont on dispose sur les sols à une valeur des sols (trad.).	7+2 (fonction d'achive et risque d'érosion)	Oui (c'est le but, + de nombreux exemples)	Oui, les méthodes sont proposées, l'utilisateur choisit les fonctions qu'ils quantifie en fonction de ses besoins.	Pour chaque fonction, plusieurs indicateurs empiriques, construits à partir de propriétés des sols ou des caractéristiques de l'environnement, sont combinés dans des tables de détermination	1m	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui (certaines, Grundwasserneinfluss)	Non	Non	Capacité	Oui	Non (mais deux des fonctions sont des aptitudes à des usages)	Non	Nombre de fonctions pour lesquelles une méthode est proposée	
	Assessment of soil multifunctionality to support the sustainable use of	"select a set of simplified Soil Function Assessment methods capturing soil multifunctionality and contributions to ecosystem services", "we quantified the general capacity of a soil to fulfil a specific function independent of the land use and of land management practices considering static or slowly changing soil				Sélection d'1 indicateur empirique pour chaque fonction dans la littérature,	1m maximum a priori (manque l'information pour la fonction)										Non, mais les auteurs abordent la question	Non (mais les méthodes sont valides uniquement pour		

Référence	Titre de la publication	Quantité quantifiée selon les auteurs	Nombre de fonctions quantifiées	Méthode reproducible ? Prise en compte d'un bénéficiaire de l'évaluation dans l'argumentation ?	L'utilisateur intervient-il dans l'évaluation	Description de la méthode)	Profondeur d'évaluation	Propriétés utilisées pour l'évaluation		Facteurs environnementaux pris en compte (pour au moins une fonction)			Facteurs anthropiques pris en compte (pour au moins une fonction)		Consistance entre les fonctions	Confrontation de la quantité quantifiée avec un usage (compatibilité)	Spécificités	
								Propriétés inhérentes	Propriétés dynamiques	Climat	Topographie-paysage	Hydro-Géologie	Couverture du sol (peut aussi être naturelle), usage	Pratiques				Quantité quantifiée
Jost et al. 2021	Dynamic soil function assessment employing land use and climate scenarios at regional scale	"evaluate levels of soil functionality in a spatially explicit manner", "how changes in SOC stocks might alter soil functions in the future", "Mainly, indicator-based assessment methods are used, which enable the spatially explicit evaluation of current levels of soil functionality"	5	Non	Non	Sélection de méthodes dans la littérature (par exemple dans Danner et al. 2003) pour avoir un indicateur empirique par fonction, répartition en 5 classes avec les seuils tirés de la littérature. Evaluation d'un état actuel et d'un état futur projeté avec évolution des propriétés dynamiques sous l'effet de l'usage et du changement climatique.	1 m.	Oui	Oui	Oui (pas dans l'évaluation des fonctions, mais dans l'évolution des propriétés dans le temps pour l'évaluation d'un état futur)	Non	Non	Oui	Non	Capacité	Non (comme Greiner, biomasse microbienne pour la fonction Habitat) + incohérences dans le discours	Non	Projection dans le futur avec des scénarios climatiques et des scénarios d'usage
Lehmann et al. 2013	Technique for Soil Evaluation and Categorization for Natural and Anthropogenic Soils (TUSEC)	"Combination rules for experts to evaluate soils"	4, déclinées en sous-fonctions	Non	Oui (l'expert qui a besoin de faire une évaluation des fonctions du sol choisit les fonctions à quantifier)	Indicateurs empiriques, chaque fonction est associée à un niveau (de 1 à 5), en combinant des propriétés ou indicateurs dans des tables de détermination empiriques (basées sur des dires d'expert.	1m.	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Capacité	Oui	Non	Nombre d'indicateurs proposé
Mueller et al. 2007	The Muencheberg Soil Quality Rating : field manual for detecting and assessing properties and limitations of soils for cropping and grazing	"This score is a measure of the long-term soil quality and will provide a rough estimate of the local crop yield potential"	Pas de fonctions : 8 indicateurs de base et 13 indicateurs de menaces.	Oui	Oui	Il choisit l'usage pour lequel il veut évaluer la qualité du sol (cropland et grassland). Indicateurs empiriques, tout est basé sur des observations de terrain et des données géographiques, climatiques, et historiques de la parcelle. Les indicateurs de base et les indicateurs de menace sont combinés pour donner une note de qualité sur 100.	1m60	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Capacité	Oui	Oui	Méthode combinant indicateurs des fonctions du sol et des indicateurs de risque. Méthode centrée sur la fonction de productivité, ajoutée à cette revue pour son niveau d'aboutissement.
Bechler and Toth 2010	Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit. Soil capacity rating (trad.)	"hat sich das Prinzip, die Leistungsfähigkeit von Böden über die Bewertung von Bodenfunktionen zu ermitteln, als der richtige Weg [...] herausgestellt" La capacité des sols par l'évaluation des fonctions du sol (trad.)	4	Oui (à travers les exemples)	Oui (choix des fonctions)	Indicateurs empirique, combinaisons de différentes propriétés du sol et de caractéristiques environnementales (tables de détermination). Répartition en 5 classes, et agrégation en un score unique.	1m	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Non	Capacité	Oui	Non	
Dabeljak et al. 2019 Sanden et al. 2019 Wall et al. 2020	Publications relatives au Soil Navigator : A Field-Scale Decision Support System for Assessment and Management of Soil Functions (Debeljak et al. 2019)	"capacity of an agricultural soil to perform the water purification and regulation function" "The primary productivity function is the capacity of a soil to supply nutrients and water and to produce plant biomass"	5	Oui (tout est pensé pour l'utilisateur)	Oui (choix de l'usage souhaité)	Agrégation en cascade d'informations sur les propriétés, la gestion et l'environnement du sol à partir d'attributs de base par des règles de décision. Possibilité d'optimiser (dans l'outil) les pratiques pour maximiser les fonctions d'intérêt.	30 premiers cm pour la productivité primaire (Sanden et al.)	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Capacité relative à un usage et des pratiques = niveau de remplissage estimé projeté ?	Dans le discours non (voir les citations retenues, on ne peut pas dire qu'une fonction est une capacité et qu'on évalue la capacité de cette fonction)	Oui	Outil très abouti et opérationnel pour les agriculteurs et les conseillers agricoles.
Oberholzer et al. 2012	A novel method for soil quality in life cycle assessment using several soil indicators	"determine the most probable changes in soil quality indicators as a result of on-farm agricultural practices"	Pas de fonctions : 9 indicateurs de la qualité des sols.	Non, on n'en parle jamais.	Non	Les pratiques culturales sont détaillées et associées à des classes d'impacts. Ensuite, les classes d'impact sont agrégées pour évaluer l'impact final des pratiques sur 9 indicateurs de la qualité de sols (variation attendue de la valeur de ces indicateurs sous l'effet des pratiques).	Pas de profondeur	Oui	Oui (via les impacts, pas de mesure)	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Variation de la capacité et/ou du niveau de remplissage de certaines fonctions sous l'effet des pratiques agricoles	Non, certains indicateurs portent sur une capacité (stabilité des agrégats) et d'autres sur un niveau de remplissage (profondeur d'enracinement)	Oui (mais plus soutenable que compatibilité ici)	Evaluation d'une variation de capacité sous un usage et non d'un état. Diversité des pratiques prises en compte
Vrebos et al. 2021	Spatial evaluation and trade-off analysis of soil functions through Bayesian networks	"indicators were developed to evaluate their performance" "calculate the soil functions' performance and trade-offs between the soil functions under current conditions. For each soil function the maximum potential was estimated"	4	Non	Non	A partir d'un ensemble de variables "explicatives" d'entrées, des réseaux bayésiens préalablement entraînés (1 par usage du sol) prédisent la valeur de 6 indicateurs (1 par fonction, 3 pour les fonctions liées à l'eau) de performance des différentes fonctions.	Pas d'information détaillée. Il semble que c'est essentiellement des propriétés de surface.	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Niveau de remplissage actuel et projeté pour des pratiques différentes	Oui	Non	Méthode (réseaux bayésiens) qui se démarque du reste de la littérature. Prise en compte de nombreuses pratiques et de nombreux usages.

Référence	Titre de la publication	Quantité quantifiée selon les auteurs	Nombre de fonctions quantifiées	Méthode reproductible ? Prise en compte d'un bénéficiaire de l'évaluation dans l'argumentation ?	L'utilisateur intervient-il dans l'évaluation	Description de la méthode)	Profondeur d'évaluation	Propriétés utilisées pour l'évaluation		Facteurs environnementaux pris en compte (pour au moins une fonction)			Facteurs anthropiques pris en compte (pour au moins une fonction)		Confrontation de la quantité quantifiée avec un usage (compatibilité)	Spécificités			
								Propriétés inhérentes	Propriétés dynamiques	Climat	Topographie-paysage	Hydro-Géologie	Couverture du sol (peut aussi être naturelle), usage	Pratiques			Quantité quantifiée	Consistance entre les fonctions	
Moebius-Clune et al. 2017	Comprehensive Assessment of Soil Health, The Cornell Framework	"soil health indicators" selected for their "ability to represent agronomically and environmentally important soil processes"	Pas de fonctions, mais 11 indicateurs de la santé.	Oui, l'outil est fait pour que les agriculteurs et leurs conseillers puissent évaluer et suivre la santé des sols et mettre en place des pratiques vertueuses.	Non	Des indicateurs sont mesurés directement sur le terrain ou en laboratoire sur des échantillons des sols. Ils sont ensuite notés sur 100 par des fonctions scores construites sur une distribution statistique d'un jeu de données. Cela permet d'identifier les contraintes principales.	15 cm pour le prélèvement des échantillons pour les tests de laboratoire.	Oui	Indirectement, (les fonctions scores dépendent de la classe texturale)	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Composante très dynamique de la capacité.	Non, indicateurs biologiques sont plutôt des indicateurs de niveau de remplissage.	Non	Outil opérationnel pour les agriculteurs basé sur des fonctions scores. Centré essentiellement sur les propriétés de surface (15 cm).
Bock et al. 2018	The Land Suitability Rating System Is a Spatial Planning Tool to Assess Crop Suitability in Canada	Aptitude des terres	Pas d'évaluation de fonction, mais de 3 "facteurs" (climat, sol, paysage)	Oui, pour des personnes qui cartographient l'aptitude des terres (outil utilisé en recherche au Canada)	Non	On évalue des limitations à la production agricole. Chaque facteur est associé à un score initial de 100. Ce facteur est décrit par un ensemble de paramètres (propriétés), qui sont associée par une fonction score à une note de limitation du facteur. On retranche à chaque facteur les valeurs des paramètres. Le score le plus bas donne le niveau d'aptitude du sol et le facteur le plus limitant (et on peut aussi identifier le paramètre le plus limitant).	Non précisé	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Compatibilité à partir d'une composante dynamique de long terme de la capacité.	Pas de quantification de fonctions	Oui	Méthode d'évaluation des terres, non centré sur les fonctions du sol. Utilisation de fonctions scores, score associé à un niveau de limitation de l'aptitude (compatibilité).
Elilli-Bargoui et al. 2021	Assessment of six soil ecosystem services by coupling simulation modelling and field measurement of soil properties	"Evaluer quantitativement 6 services écosystémiques" (trad.)	Pas de fonctions, mais 6 services	Non, utilisé pour la recherche	Non	Modélisation mécaniste sur 30 ans en utilisant le modèle STICS. La succession des cultures (maïs-blé-moutarde blanche) et le calendrier des pratiques se répètent et sont les mêmes pour tous les sols.	Limitation de la profondeur d'enracinement à 1m, les sondages des sols vont à 2m maximum	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Niveau de remplissage projeté pour un usage de référence : capacité	Oui (on évalue des flux à chaque fois)	Non (il y a un usage de référence, mais le but n'est pas de déterminer quel est le meilleur sol pour cet usage)	Méthode similaire à Choquet et al. 2021.
Dominati et al. 2014	A soil change-based methodology for the quantification and valuation of ecosystem services from agro-ecosystems: A case study of pastoral agriculture in New Zealand	"quantifier et évaluer (monétairement en détail la contribution des sols à la provision de services écosystémiques"	Pas de fonctions mais des services : 13/14 identifiés	Non, utilisé pour la recherche	Non	Modélisation mécaniste avec un modèle de culture (SPASMO) sur 35 ans, avec l'usage réel. Les sorties du modèle sont utilisées pour construire des indicateurs des niveaux de remplissage des différentes fonctions.	Non précisé	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Niveau de remplissage (réel)	Oui (sauf peut être support pour les infrastructures et les animaux)	Non	Evaluation des flux biophysiques et de la valeur monétaire des services.
Thoumzeau et al. 2019 A and B	Biofunctool® : a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: concept and validation of the set of indicators Part B: investigating the impact of land management of rubber plantations on soil quality with the Biofunctool® index	"Valider la pertinence des des indicateurs proposés pour évaluer l'impact de la gestion du sol sur la qualité des sols". "Biofunctool ne fournit pas une mesure absolue de la qualité mais plutôt une évaluation relative dans un contexte".	3	Oui	Non	Indicateurs empiriques sélectionnés par des experts. Les indicateurs reflètent le fonctionnement du sol (et ne sont pas que des propriétés ou des propriétés agrégées). Il y a 10 (+2) indicateurs pour 3 fonctions. Il est possible d'agréger les indicateurs en un indice de qualité unique avec la méthode des fonctions scores.	25 cm	Non	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Capacité	Oui (selon l'interprétation des indicateurs)	Non	Indicateurs construits pour refléter le fonctionnement du sol, et pas sur la base de propriétés disponibles couramment dans les bases de données. Evaluation (assumée) d'une qualité relative. Focus sur le fonctionnement biologique

Seules 4 publications réalisent une modélisation pour obtenir des niveaux de remplissage (Dominati et al., 2014; Choquet et al., 2021; Ellili-Bargaoui et al., 2021; Vrebos et al., 2021), et il semble qu'il n'y en a pas plus parmi les 46 publications sélectionnées. Vrebos et al. (2021) se démarquent en utilisant une modélisation empirique via des réseaux bayésiens entraînés sur des données de sortie du modèle DayCent. Les trois autres utilisent des modèles mécanistes de culture pour simuler directement les processus d'intérêt. Les niveaux de réalisation des fonctions sont alors obtenus via les sorties du modèle. On peut noter que pour Choquet et al. (2021) et Ellili-Bargaoui et al. (2021), les simulations sont réalisées pour une succession culturale et des pratiques des références, peu importe l'usage réel. Les auteurs comparent donc des niveaux de remplissages projetés dans une situation de référence, la quantité réellement évaluée est donc davantage une capacité actuelle qu'un niveau de remplissage actuel.

Une seule publication (Rabot et al., 2022) évalue un potentiel et ne s'appuie que sur des propriétés intrinsèques des sols. Parmi les 26 publications qui restent à lire, il ne semble pas que d'autres évaluent également un potentiel.

On peut noter que, pour certaines méthodes, il y a un manque de consistance entre les différentes fonctions, ou alors dans le discours, c'est-à-dire que pour une fonction, une capacité est évaluée, et pour une autre, un niveau de remplissage. En général, c'est assez ambigu et cela dépend de l'interprétation des indicateurs. Par exemple, la biomasse microbienne peut être un indicateur du niveau de réalisation de la fonction habitat pour les microorganismes, mais peut aussi être un indicateur de la capacité du sol à décomposer la matière organique et participer au cycle des nutriments.

4-5. *Lien avec un utilisateur, évaluation d'une compatibilité*

Pour les publications lues, on a essayé de se concentrer sur les outils les plus aboutis (en termes de connexion avec un commanditaire potentiel), les résultats de cette partie ne sont donc peut être que temporaires.

On voit que la plupart des publications utilisent des méthodes qui ne sont pas reproductibles, ou pas pensées pour être reproduites ou utilisées de manière appliquée : ce sont essentiellement des méthodes pour les besoins de la recherche. Les outils pensés spécifiquement pour des commanditaires sont tout de même nombreux, notamment le SMAF (Andrews et al., 2004), le Cornell Assessment Framework (Moebius-Clune et al., 2016), le Muencheberg Soil Quality Rating (Mueller et al., 2007), le Soil Navigator (Debeljak et al., 2019; Sandén et al., 2019; Wall et al., 2020) et BioFuncTool® (Thoumazeau, Bessou, Renevier, Panklang, et al., 2019; Thoumazeau, Bessou, Renevier, Trap, et al., 2019). En général, une certaine liberté lui est laissée.

Certaines méthodes relient la quantité quantifiée à la compatibilité d'un usage. Cela fait donc appel à des données supplémentaires sur les prérequis des différents usages envisagés. Ce sont en général des usages agricoles. Par exemple, Rabot et al. (2022) relie le « potentiel de multifonctionnalité » (qui est un potentiel dans notre cadre) à trois usages : terre arable, prairie, et culture pérenne. On peut noter qu'une publication (Oberholzer et al., 2012) évalue la soutenabilité d'un usage, sur la base (dans notre cadre) des variations attendues de la capacité du sol sous l'effet des pratiques. On peut aussi noter que les fonctions scores (des 38 publications concernées) sont développées pour un usage en particulier, le score final de « qualité » ou de « santé » obtenu dans ces publications est donc un score de la capacité à soutenir un usage, donc de compatibilité.

4-6. La représentation du sol

Le dernier point de comparaison des publications concerne la représentation du sol. On voit que, pour une grande partie des publications (parmi celles en orange), la profondeur d'évaluation est d'un mètre. Dans notre cadre conceptuel, on a fixé la profondeur maximum du sol : 2 m. Cependant, dans beaucoup de cas, les données sur les sols ne sont disponibles que jusqu'à 1 m, ce qui limite dans tous les cas l'évaluation. Pour certaines publications (3 en tout), la profondeur d'évaluation n'est pas précisée : on ne peut donc pas savoir exactement à quoi se réfèrent les auteurs avec le mot « sol ». Enfin, 5 publications concernent uniquement les horizons de surface du sol (en jaune), jusqu'à 30 cm maximum. Parmi eux, on compte notamment le SMAF, BioFuncTool[®], le Cornell Assessment Framework ainsi que le Soil Navigator, qui sont des outils assez élaborés et utilisés fréquemment. Dans le cadre de notre représentation du sol, on devrait donc préciser que ce sont des outils d'évaluation des fonctions de surface du sol et non des fonctions du sol.

Ensuite, on peut s'intéresser aux types de propriétés et de facteurs inclus dans l'évaluation. On voit (avec les couleurs) qu'il n'y a pas de règle générale, chaque auteur prenant des facteurs différents. A part dans Rabot et al. (2022) et dans Thoumazeau, Bessou, Renevier, Trap, et al. (2019), qui ne prennent en compte respectivement que des propriétés intrinsèques et des propriétés dynamiques, toutes les publications revues utilisent les deux types de propriétés, au moins la texture pour les propriétés inhérentes.

La couverture du sol et les pratiques agricoles sont rarement prises en compte. En effet, elles n'entrent pas dans la définition de la capacité du sol, mais dans le niveau de remplissage, et servent également dans l'évaluation de la compatibilité et de la soutenabilité. C'est ce que l'on observe dans la revue. Seul le Soil Navigator (Debeljak et al., 2019) permet de prendre en compte tous les facteurs identifiés dans le cadre conceptuel. Même lorsque ces facteurs sont pris en compte, on peut se demander comment ils le sont (par exemple si ce n'est que pour une fonction, ce que le tableau présenté ici ne permet pas d'identifier). On voit donc qu'il y a dans tous les cas une simplification de la représentation du sol. Celle-ci n'est pas toujours explicite, et alors il a fallu aller chercher dans les formules employées pour la quantification si les différents facteurs étaient pris en compte et comment.

5- Résultats : exemple d'application

5-1. Scénario

Des agriculteurs cherchent à savoir quel est le meilleur sol pour l'implantation d'une parcelle de vigne. Les parcelles se situent dans le bassin-versant du Rieutort dans le Sud de la France (Hérault), et sont donc soumis à un climat méditerranéen. Leur objectif est de réaliser des vins de qualité intermédiaire en quantité, et ils ont l'équipement nécessaire pour entretenir le rang et l'interrang (réaliser un labour).

5-2. Elaboration de la méthode à l'aide du cadre conceptuel

Les commanditaires, les viticulteurs, qui sont aussi les utilisateurs et les bénéficiaires dans notre cas, souhaitent connaître la meilleure parcelle pour une vigne. On va donc évaluer la compatibilité des sols à la viticulture. Leurs exigences portent sur la qualité et la quantité de la production uniquement (intérêt de ces utilisateurs), ils envisagent d'implémenter des pratiques agricoles pour arriver à leur fin, notamment le travail du sol pour réduire l'enherbement et sa compétition avec la vigne.

D'après l'expertise au laboratoire et consultation bibliographique (Gambetta et al., 2020), il se trouve que l'eau est le principal facteur limitant le rendement et la qualité des grappes de raisin en viticulture. De plus, la gestion de l'eau en climat méditerranéen pour protéger les infrastructures humaines est particulièrement critique, notamment la gestion des crues (Cosandey et al., 2005).

On choisit donc de s'intéresser aux fonctions de régulation de l'eau (une catégorie de fonctions dans le cadre conceptuel). Plus particulièrement, les viticulteurs sont intéressés par la couverture du besoin en eau des vignes par le climat et le stockage dans le sol (service), on va donc tenter de quantifier la fonction d'alimentation en eau de la vigne par le sol, qui correspond au flux d'eau qui passe du sol à la plante.

Ce flux d'eau est contrôlé par de nombreux processus, qui déterminent le stock d'eau transpirable : infiltration d'eau en surface, puis dans la porosité et éventuellement hors de la zone accessible aux racines, évaporation, transpiration par l'enherbement, rétention d'eau dans la porosité, etc. Les flux environnementaux (facteurs environnementaux) sont les précipitations, le rayonnement solaire (conditionne la croissance et les besoins en eau des plantes), les eaux de ruissellement amont et les remontés capillaires. Les propriétés qui conditionnent ces processus sont l'état de surface, la conductivité hydraulique des différents horizons du et du matériau sous-jacent (propriété de l'environnement), l'état hydrique instantané, la profondeur d'enracinement, la texture et la densité apparente (qui impactent le réservoir utile, Dobarco et al., 2019), etc.

On voit qu'il y a une grande diversité de processus et de propriétés en jeu dans le remplissage de la fonction d'alimentation de la vigne en eau. En particulier, elle dépend énormément des flux d'eau entrant dans les sols, qui sont eux-mêmes très variables d'une année sur l'autre en climat méditerranéen. Les approches de quantification d'une capacité ou d'un potentiel pour cette fonction trouvées dans la littérature ne semblent pas convenir au besoin des viticulteurs, pour deux raisons. En premier lieu, elles se basent presque exclusivement sur le réservoir utile et la conductivité hydraulique du sol (Danner et al., 2003 par exemple) et ignorent totalement le climat, qui est pourtant critique. En second lieu, il est alors difficile de faire le lien entre ces indicateurs de capacité et la couverture réelle des besoins en eau de la vigne par le sol (difficulté de trouver un critère seuil pour la compatibilité).

Pour ces raisons, nous avons décidé d'évaluer un niveau de remplissage de la fonction d'alimentation en eau des plantes. Pour cela, nous utilisons le modèle de bilan hydrique WaLIS (Water baLance for Intercropped Systems) (Celette et al., 2010) version 3, avec notamment des améliorations sur la modélisation de la dynamique de l'enherbement et de l'impact des travaux du sol (Naulleau, 2021). Ce modèle nous permet d'obtenir les potentiels de base de la vigne (mesure de référence pour estimer l'état hydrique de la vigne, Naulleau, 2021), pour lesquels on dispose de seuils dans la littérature. Notamment, Ojeda & Saurin (2014) donnent les potentiels de base du sol en fonction des stades de développement de la vigne optimaux pour différents types de production (Figure 8). Pour les objectifs des viticulteurs, on chercherait à être au niveau des courbes B et C. Les processus, propriétés, et flux environnementaux pris en compte dans WaLIS sont listé dans le Tableau 3. C'est la représentation simplifiée du sol pour la quantification.

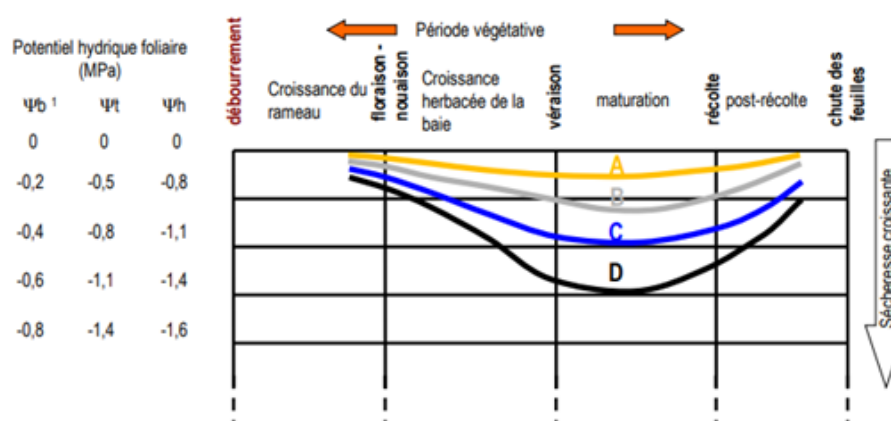


Figure 8 : figure tirée de Ojeda & Saurin (2014) : différentes stratégies d'irrigation possibles pour contrôler l'état hydrique du vignoble en fonction de la période végétative et du type de produit recherché : (A) moûts concentrés, jus de raisin, vins de table et jeunes vignobles en formation; (B) vins blancs, vins rouges légers, fruités; (C) vins jeunes de qualité, équilibrés mais avec prédominance du fruit sur la structure, seuils limites pour les vins blancs et (D) vins de qualité, concentrés, équilibrés et aptes pour le vieillissement. ¹ potentiel hydrique de base (Ψ_b), potentiel de "tige" au zénith (Ψ_t), potentiel de feuille au zénith (Ψ_f)

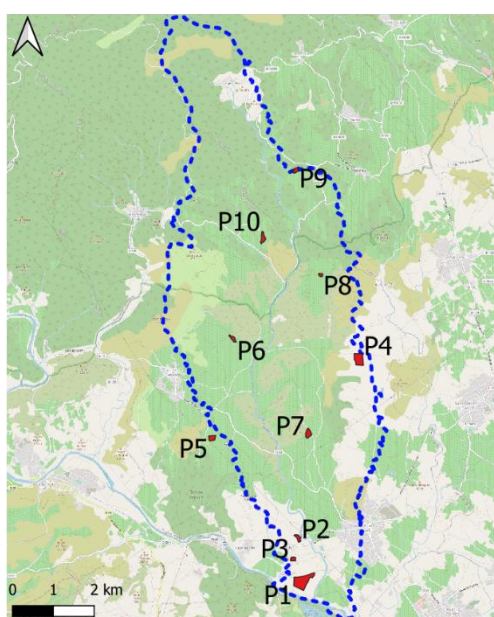


Figure 9 : Localisation des parcelles expérimentales dans le bassin versant du Rieutort.

5-3. Les parcelles et les pratiques agricoles

Les parcelles en question sont les parcelles 1 et 7 (P1 et P7) suivies dans Naulleau (2021). Leur localisation dans le bassin versant du Rieutort, ainsi qu'une photo des sondages pédologiques réalisés le 28 juin 2023 sont données sur les Figure 9 Figure 10. Compte tenu des conditions (sol très sec), nous avons volontairement arrêté le premier sondage à 80 cm. Dans le référentiel pédologique (Baize & Girard, 2008), P1 correspond à un FLUVISOL carbonaté de lit majeur, et P7 à un CALCOSOL caillouteux sur calcaire marin du Miocène (voir l'annexe 6 pour les description détaillées des



Figure 10 : sondages pédologiques à la tarière des parcelles P1 (gauche) et P7 (droite). Le peu de terre extrait de P7 témoigne de sa pierrosité importante.

profils). Les réservoirs utiles¹ de ces sols ont été estimés dans Naulleau (2021) à 300 mm pour P1 et 180 mm pour P7, ce qui est cohérent avec les observations de terrain (sol sur d'alluvions épaisses pour P1, sol moyennement profond et caillouteux pour P7). Avec les « curve number » pour la détermination du partage entre ruissellement et infiltration, ce sont les seules propriétés du sol prise en compte dans le modèle.

Pour ces parcelles, Naulleau (2021) a obtenu auprès des viticulteurs les dates d'intervention sur le couvert du sol et les dates de débourrement de la vigne pour les années 2018-2019 et 2019-2020. Ce sont ces données que nous utilisons dans les simulations des pratiques des viticulteurs dans notre scénario, car elles correspondent à la réalité des pratiques, qui diffèrent d'une année sur l'autre et d'une parcelle à l'autre en fonction du sol et du climat. Pour les deux parcelles, il n'y a pas d'enherbement permanent de certains interrangs, ni d'irrigation.

Tableau 3 : processus, propriétés et facteurs environnementaux pris en compte dans l'évaluation avec WaLIS.

Processus modélisés	Propriétés du sol	Facteurs environnementaux	Flux entrants	Facteur et flux non pris en compte pour simplifier l'évaluation (et parce que le modèle ne le permet pas)
-Infiltration d'eau dans le sol (remplissage, stockage, drainage) -Transpiration du couvert, de la vigne -Croissance du couvert, de la vigne, impactés notamment par l'état hydrique du sol -Arrêt de la croissance du couvert après un labour	-Quantité d'eau totale transpirable par les plantes (TTSW), assimilée au réservoir utile -Curve number pour caractériser les propriétés hydriques de surface.	-Climat	-Chaleur -Précipitations	-Topographie (pas de ruissellement amont) -Hydrogéologie (pas de remontée capillaires, notamment pour P1)

5-4. Paramétrisation et initialisation du modèle

On fait les simulations sur deux années climatiques assez contrastées : les années 2018-2019 et 2019-2020, qui sont présentées sur la Figure 11. Les températures moyennes sur les deux années sont comparables, ainsi que les précipitations automnales et hivernales qui contribuent fortement à la recharge en eau du sol. La différence majeure est la quantité de précipitations entre avril et juin, puis en août, qui sont les périodes de forte demande en eau par la vigne (c'est la période où elle transpire

¹ C'est la quantité maximale d'eau transpirable par la vigne (TTSW) qui a été en réalité estimée, à l'aide d'une inversion du modèle WaLIS, et qui représente plus fidèlement la quantité d'eau disponible pour la vigne (Cousin et al., 2022). Pour cette étude, on assimile les deux quantités.

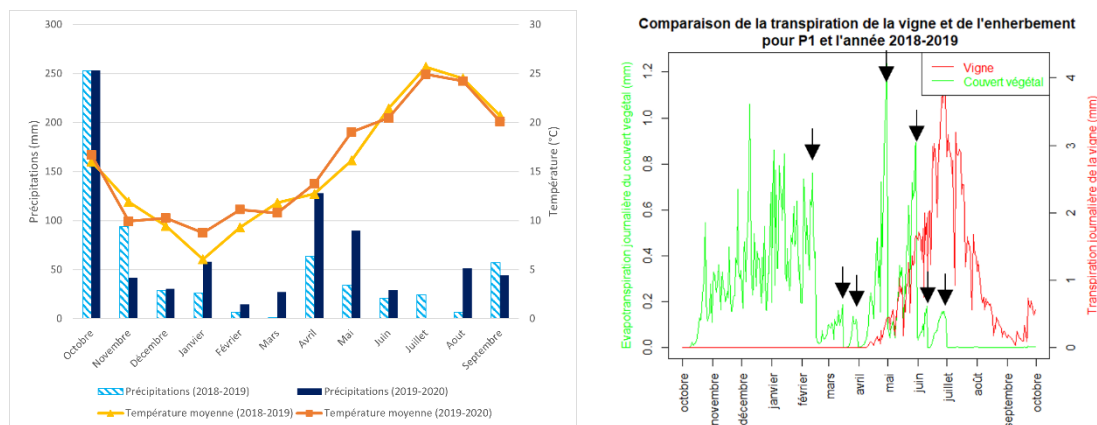


Figure 11 : comparaison des climats sur les deux années simulées (gauche), et transpiration simulée de la vigne et de l'enherbement pour P1 pour l'année 2018-2019 (droite). Les flèches noires indiquent les dates de travaux du sol.

le plus, Figure 11). En tout, il a plu 616 mm entre octobre 2018 et octobre 2019, et 768 mm sur la même période en 2019 et 2020.

Un des problèmes qui se pose est l'initialisation du modèle. En effet, il faut choisir des valeurs pour les paramètres qui décrivent le développement du couvert et la transpiration de la vigne, ainsi que l'état hydrique du sol, à savoir : p_{ini} , la proportion initiale de sol enherbé, LAI_{ini} l'indice foliaire initial de l'herbe, $TTSW_h$ le réservoir accessible à l'herbe, ASW la teneur en eau, et ASW_h la teneur en eau accessible à l'herbe. Pour la vigne, on ne peut pas maîtriser, avec la structure actuelle du code, la transpiration entre le 01/10 (début des simulations) et le 01/11 (date d'arrêt de la transpiration), c'est une des limites de nos simulations.

Pour l'initialisation de l'année 2018-2019, on réalise deux simulations de l'année 2017-2018 et on regarde la valeur des paramètres à initialiser à la fin de la simulation. Dans le premier cas, on part d'un sol avec un réservoir vide et un enherbement nul, et dans le deuxième cas d'un sol avec tous les réservoirs pleins et un enherbement maximal bien développé. On observe (Tableau 4) que dans les deux cas, totalement opposés, on arrive à un enherbement très faible et à un faible taux de remplissage des différents réservoirs, avec des valeurs comparables dans les deux cas. Cela veut dire que, pour cette année-là, le statut de développement de l'enherbement et le remplissage des réservoirs ne dépendent pas des valeurs initiales de l'année précédente. Pour l'initialisation de l'année 2018-2019, on prend donc les valeurs initiales obtenues ainsi

Tableau 4 : détermination des paramètres d'initialisation du modèle pour les parcelles P1 (en bleu) et P7 (en jaune). Le tableau se lit indépendamment pour chaque couleur.

Paramètre	Description	Unité	Initialisation 1				Initialisation 2				Simulation 2018-2019		Simulation 2019 - 2020	
			Valeurs d'entrée		Valeurs au dernier jour de la simulation		Valeurs d'entrée		Valeurs au dernier jour de la simulation		Valeurs retenues de précédemment		Valeurs au dernier jour de l'année précédente	
p_{ini}	Proportion initiale d'enherbement		0	0	0,01	0,01	1	1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01
$TTSW_{hini}$	Réservoir accessible à l'herbe	mm	0,1	0,1	0,1	0,1	60	60	0,1	0,1	0,1	0,1	6,4	5,8
ASW_{hinit}	Quantité d'eau dans le réservoir de l'herbe		0,01	0,01	0,007	0,002	60	60	0,009	0,002	0,01	0,002	0,69	0,85
ASW_{vinit}	Quantité d'eau dans le réservoir de la vigne		0,01	0,01	22,2	3,2	240	120	27,1	3,3	25	3,2	31	25
LAI_{init}	LAI initial de l'enherbement		0	0	0	0	2	2	0,001	0	0,001	0,001	0,19	0,16
			P1		P7									

(qui sont les mêmes dans les deux cas. Pour l'initialisation de l'année 2019-2020, on prend les valeurs à la fin des simulations précédentes. L'ensemble des paramètres d'entrée du modèle sont donnés en annexe 4.

5-5. Résultats des simulations

On a présenté sur la Figure 11 la transpiration de l'enherbement et de la vigne pour P1 et l'année 2018-2019. On voit que la période de transpiration de la vigne est très localisée entre mai et septembre. On voit également que les labours sont efficaces pour réduire la transpiration de l'enherbement, qui ne repart pas après juillet, en conséquence du manque d'eau et des températures importantes.

Sur la Figure 12, on a représenté la quantité eau disponible pour la vigne (ASWv, à gauche) et le potentiel de base du sol (à droite) pour les deux années simulées et les deux parcelles. On voit qu'il y a systématiquement plus d'eau pour la vigne dans le sol P1 que dans P7, mais que ces stocks se rapprochent en été. Avoir un plus grand stock d'eau ne permet pas de savoir si cette eau est accessible pour la vigne ou non. C'est le potentiel de base qui permet d'avoir cette information. On aurait pu tracer la fraction d'eau disponible pour les plantes, en divisant ASW avec TTSW, mais le potentiel de base est la grandeur qui nous intéresse pour le seuillage (Figure 8). On passe de l'un à l'autre par une relation logarithmique. En hiver, le sol P7 est comparativement plus rempli que le sol P1, l'eau est plus facilement disponible, mais ce n'est pas important car la vigne ne prélève pas d'eau à cette période. Pour les deux années, la tendance s'inverse aux alentours de mai, même si pour les deux sols la valeur du potentiel diminue drastiquement, arrivant à des minimums de -0,8 MPa (P1, 2019), -4 MPa (P7, 2019, valeur surprenante), -0,5 MPa (P1, 2020) et -1 MPa (P7, 2020).

Dans Ojeda & Saurin (2014) (Figure 8), le potentiel de base seuil serait d'environ -0,4 MPa, qui correspond à la valeur minimale rencontrée dans la trajectoire « idéale » C. On peut aussi se référer à l'annexe D de Naulleau (2021), où des potentiels de base de -0,6 MPa et -0,5 au 1^{er} août sont considérés respectivement comme des contraintes sévère et modérée.

On peut donc conclure que la parcelle P7, avec l'itinéraire technique envisagé, ne sera pas compatible avec l'usage projeté par les viticulteurs. Sur les deux années testées, on atteint un potentiel de moins de -1 MPa entre août et septembre, ce qui aura

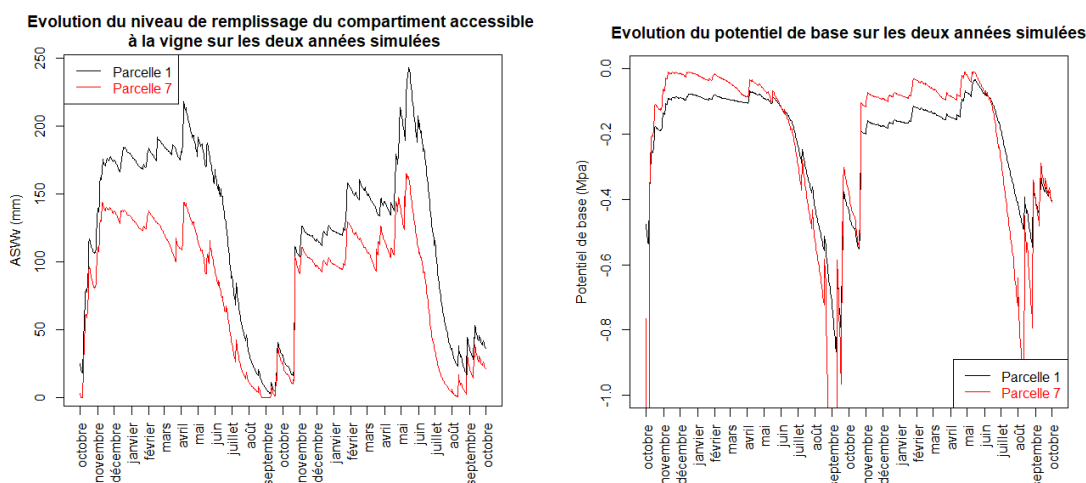


Figure 12 : évolution temporelle simulée du niveau de remplissage en eau du compartiment accessible à la vigne (gauche) et du potentiel de base (droite) pour P1 et P7 pour les deux années modélisées. ASWv : available soil water for vine plants.

de grosses conséquences sur les rendements. La valeur de -4 MPa est surprenante et certainement mal estimée : en effet, le point de flétrissement permanent se situe aux alentours de -1,5 MPa, les plants de vigne ne pourraient pas survivre à une période d'une quinzaine de jour à ce potentiel. L'origine de cette anomalie pourrait être la relation entre la teneur en eau du sol et le potentiel de base, qui est très variable en fonction des sols (on a pris l'expression donnée par Naulleau, 2021). Pour la parcelle P1, les viticulteurs pourront atteindre leurs objectifs, mais pas les années très sèches en été, même si les sols sont à capacité à la fin de l'hiver. Pour P1, il y a vraisemblablement une nappe alluviale qui pourrait contribuer à des remontées capillaires, et à permettre une meilleure compatibilité.

5-6. *Pour aller plus loin*

Cet exemple est très simplifié, il sert juste à illustrer notre cadre conceptuel. Cependant, nous avons pris toutes les étapes au sérieux, et on pourrait imaginer faire une étude plus détaillée en :

- Comparant quantitativement les sorties du modèle avec les données dont nous disposons sur le potentiel de base optimal pour la croissance de la vigne en fonction de l'usage final du raisin (Figure 8), et argumenter ces seuils sur une base bibliographique solide.
- Abordant d'autres fonctions que la fonction d'alimentation en eau. Notamment, on pourrait regarder la quantité d'eau qui rejoint les nappes, et le partage entre l'eau qui s'infiltre et l'eau qui ruisselle. Ainsi, on pourrait envisager des scénarios où les agriculteurs ont des intérêts compétitifs (limitation du ruissellement et augmentation de la biodiversité par l'implémentation de cultures de couverture, tout en gardant une alimentation en eau correcte de la vigne).
- Simulant davantage d'années pour avoir une meilleure représentativité du climat méditerranéen (avec par exemple des années où les sols ne sont pas à capacité en sortie d'hiver).
- Prenant en compte d'autres pratiques culturales, comme le modèle WaLIS le permet. Par exemple, on pourrait ajouter de l'irrigation, des tontes de l'interrang, la mise en place de cultures de couverture sur une certaine proportion des interrangs, *etc.*
- Prenant en compte d'autres facteurs environnementaux : remontées capillaires et ruissellement amont.

Finalement, l'exercice qui a été réalisé dans cette partie peut s'assimiler un exercice de détermination de l'aptitude d'une terre à une culture (Bock et al., 2018). Ici, la plus-value du cadre conceptuel est dans la clarification de la méthode, et dans la possibilité, avec les fonctions du sol, d'englober plus de critères que la productivité dans la compatibilité du sol (même si ce n'est pas ce qui est fait ici).

6- Discussion

6-1. *L'intérêt du cadre conceptuel*

Notre cadre conceptuel est une proposition parmi d'autres (Dominati et al., 2010; Evangelista et al., 2023). Il nous a semblé important d'insister sur la différence entre un niveau de remplissage d'une fonction et une capacité à remplir une fonction, les deux termes étant souvent employés de manière ambiguë dans la littérature. De même, nous pensons qu'il est important de donner une représentation du sol et de la manière dont il fonctionne. L'originalité réside ici dans l'identification précise du rôle des facteurs extérieurs dans ce fonctionnement, comme responsables de flux entrants et sortants des sols. Enfin, il nous a également semblé important d'insister sur les différents utilisateurs du sol, qui sont ceux qui dictent les seuils, et surtout qui déterminent les préférences pour l'une ou l'autre fonction, et les moyens déployés pour arriver à leurs fins (facteurs anthropiques).

En Partie 1-6, on a vu que l'évaluation des sols avait en général 5 grands objectifs. Ces 5 objectifs peuvent être exprimés avec les termes bien définis et délimités de notre cadre conceptuel. Avec la revue bibliographique et l'exemple d'application, on a montré que notre cadre répond aux objectifs présentés en Partie 1-5. Le cadre peut servir à la fois de clé de lecture et de comparaison des approches de la littérature, et de guide pour élaborer une méthode d'évaluation des sols.

6-2. *Enseignements de la revue de littérature*

La revue bibliographique à l'aide du cadre conceptuel mène à plusieurs constats :

- La grande majorité des méthodes d'évaluation des sols se base sur la capacité, souvent sans expliciter clairement que c'est bien une « capacité » qui est évaluée. Cela peut rendre la compréhension de la démarche particulièrement ardue, comme explicité en introduction (Partie 1-3). Par exemple, Jost et al. (2021) annoncent évaluer des « niveaux de fonctionnalité », qui correspondraient donc à des niveaux de remplissage dans notre cadre. Cependant, à la lecture des indicateurs utilisés, on comprend qu'il s'agit plutôt d'une capacité.
- Toutes les publications n'ont pas la même définition du sol évalué (en termes de profondeur).
- Il n'y a pas de règle générale qui ressort des méthodes revues pour la prise en compte des facteurs environnementaux dans une capacité ou un potentiel. Dans notre cadre conceptuel, il est nécessaire de les y inclure (Tableau 1). Pour nous, à l'image de ce que nous avons réalisé pour l'exemple d'application (Partie 5-2), les différents composants de représentation du sol qui interviennent dans la réalisation des fonctions d'intérêt doivent être au préalable listés, et les simplifications doivent être justifiées.
- Pour la répartition en classes de fonctionnalité ou le scorage des indicateurs, la base de connaissance pour déterminer les seuils est dans la grande majorité des cas non explicitée, obtenue à dire d'experts, ou alors grâce aux caractéristiques statistiques d'un jeu de donnée. Dans le premier cas, rien ne permet au lecteur de juger de la pertinence de ces seuils. Dans le deuxième cas, les seuils sont souvent pertinents pour le contexte pédoclimatique de l'étude, mais ne sont pas généralisables. Et dans le troisième cas, la démarche statistique ne permet de comparer des sols que relativement à ceux du jeu de données, qui peut très bien ne pas être représentatif d'une réalité. Dans l'exemple d'application, nous avons

essayé d'identifier des seuils dans la littérature scientifique. C'est une démarche qui ne peut aboutir que si des études sont disponibles pour la valeur seuil voulue. Si nous avions voulu tester la compatibilité de sols avec la culture de mirabelliers, il n'est pas certain que nous aurions trouvé des seuils dans la littérature.

- Il y a beaucoup d'approches multifonctionnelles d'évaluation des sols, mais encore peu qui étudient en détail les synergies et les compromis entre fonctions, ainsi que la réalisation simultanée de différentes fonctions dans un usage donné.
- Peu de publications quantifient un niveau de remplissage. Cela peut s'expliquer par le fait que les seuls moyens d'évaluer un niveau de remplissage sont la mesure directe (d'un flux de sortie du sol, comme dans Choquet et al., 2021), ou alors la modélisation. Mettre en place une campagne de mesure n'est pas toujours abordable, et toutes les fonctions ne peuvent pas forcément être évaluées ainsi. Pour la modélisation, cela demande des données en plus sur les pratiques de gestion des sols qui peuvent être difficiles à obtenir. De plus, certains processus, biologiques notamment, peuvent être difficiles à modéliser. Comme toutes les fonctions ne s'apprécient pas sur les mêmes échelles de temps, et étant donné la diversité des processus mis en jeu, réussir à avoir une approche multifonctionnelle par la modélisation ne va pas de soi (Dominati et al., 2014, réussissent à couvrir le plus de fonctions par modélisation). Cependant, nous sommes convaincus que ces approches mériteraient d'être davantage explorées, d'une part parce qu'un niveau de remplissage d'une fonction peut s'assimiler à un service écosystémique, qui est une notion utile pour communiquer avec des acteurs du territoire, et d'autre part parce que cela permet une approche de la compatibilité qui prenne en compte explicitement les facteurs extérieurs, comme nous l'avons illustré dans l'exemple d'application.
- On peut utiliser des usages ou des états de référence dans l'évaluation de différentes quantités. Dans le cadre de la sécurité des sols (Koch et al., 2013; McBratney et al., 2014; Evangelista et al., 2023), il est proposé d'utiliser un « géosol » pour évaluer le potentiel du sol, qui correspond à une version du sol d'étude qui n'aurait jamais subi de pression anthropique. La difficulté est de trouver un tel sol de référence dans le paysage. Choquet et al. (2021) et Ellili-Bargaoui et al. (2021) quantifient des niveaux de remplissage des fonctions, mais pour un usage de référence. Cela permet de comparer, pour un cas particulier, la capacité des sols en prenant en compte explicitement les facteurs extérieurs.
- L'interprétation des indicateurs obtenus n'est pas toujours aisée. C'est un avantage du niveau de remplissage par rapport à la capacité : le niveau de remplissage est objectif, là où la capacité (et le potentiel), en faisant appel à des connaissances empiriques sur les liens indicateur-fonction, introduit de la subjectivité. Les méthodes les plus sophistiquées (Mueller et al., 2007; Debeljak et al., 2019) sont aussi celles qui nécessitent le plus de « connaissances d'expert » dont la justesse et la pertinence peuvent être débattues. Par exemple, le soil navigator (Debeljak et al., 2019) fonctionne par agrégation successive d'un nombre important de propriétés du sol ou de caractéristiques de l'environnement et de la gestion du sol, et nécessite pour cela un très grand nombre de règles de décision, ce qui augmente en conséquence la subjectivité du résultat final.

6-3. Conséquences méthodologiques du cadre conceptuel

Le cadre conceptuel réserve une place importante aux acteurs du territoire, aux utilisateurs et bénéficiaires du sol. Pour nous, il n'y a pas de mesure ou d'indicateur

purement objectif d'une « qualité » d'un sol. Les acteurs interviennent donc dans le choix des fonctions à quantifier, des indicateurs pour l'évaluation (sont-ils compréhensibles, reproductibles ?), et éventuellement dans la détermination des seuils. Dans l'exemple d'application, les acteurs ont des exigences particulières (qualité et quantité), et c'est ce qui détermine le seuil de compatibilité utilisé.

Dans notre cadre, on met à disposition trois notions distinctes pour quantifier des fonctions d'un sol : niveau de remplissage, capacité et potentiel. Il faut bien comprendre la différence conceptuelle entre ces quantités : elles ne sont pas uniquement différentes parce que les méthodes d'évaluation diffèrent, mais parce qu'elles ne donnent pas la même information sur le sol. On peut par exemple se poser la question, centrale dans le suivi des sols : qu'est-ce que l'on cherche à maximiser, à optimiser ? Est-ce la capacité, le niveau de remplissage ? Ou plutôt une combinaison des deux : maximiser le niveau de remplissage des fonctions d'intérêt à capacité constante (soutenabilité). Ou alors essayer de rapprocher la capacité du sol de son potentiel (pour quelles fonctions ?), quitte à perdre en niveau de remplissage de certaines fonctions ? Pour nous, ce sont les questions qui doivent structurer la réflexion autour de la gestion des sols et l'élaboration d'outil d'évaluation pour cette gestion.

6-4. *Limites du cadre conceptuel*

La notion de base que nous avançons pour l'évaluation des sols est celle de fonction des sols. On a donc défini dans le cadre conceptuel différents termes relatifs à cette notion (capacité, niveau de remplissage). Cela peut donner une vision un peu rigide du sol et des outils nécessaires pour l'évaluer. Par exemple, on a défini une dégradation comme une diminution de la capacité du sol à remplir une fonction. Cela peut poser deux problèmes. En premier lieu, on n'a pas besoin d'utiliser le vocabulaire du cadre conceptuel, qui peut être un peu lourd, pour savoir si le sol se dégrade. Notamment, on pourrait simplement regarder l'état d'activité de « processus de dégradation » (Dominati et al., 2010). On n'a pas besoin de relier une perte de sol aux fonctions du sol pour dire que le sol se dégrade à cause de l'érosion. Ici, la notion de capacité peut servir, non pas à faire le diagnostic de la dégradation, mais à en déterminer les conséquences sur les fonctions du sol, qui n'est peut-être pas l'information que l'on cherche à obtenir. En second lieu, il y a toujours des compromis entre des fonctions, et donc dans la plupart des cas, avec les définitions de notre cadre conceptuel, on ne peut pas affirmer « le sol se dégrade », mais plutôt « une des fonctions du sol se dégrade ». Par exemple, l'érosion diminue la profondeur du sol, ce qui dégrade sa capacité à stocker de l'eau. Cependant, cela augmente aussi sa capacité à recharger les nappes souterraines.

On a défini la soutenabilité d'un usage comme l'absence de dégradations sous cet usage. Cela est en contradiction avec le constat que nous faisons que le passage d'un usage à un autre peut entraîner nécessairement des dégradations (parce qu'on ajoute des contraintes). Il faudrait peut-être ajouter à la définition des considérations temporelles : est-ce que l'usage entraîne des dégradations supplémentaires par rapport à un usage précédent, et ces dégradations sont-elles réversibles par l'allocation d'un nouvel usage en un temps acceptable ?

Une autre limite du cadre et l'utilisation de notions comme « processus » et « fonctions ». Nous avons fait un effort pour que leurs définitions soient les plus précises possible, cependant, ces termes sont ambigus (Jax, 2005; Baveye et al., 2016), leur définition dépend également de la conception de chacun de leurs disciplines respectives, et cela peut freiner l'adoption d'un cadre commun.

7- Conclusion

Le cadre conceptuel élaboré durant le stage répond au besoin identifié de fournir un cadre unificateur pour l'évaluation des fonctions des sols afin de comparer les méthodes d'évaluation existantes dans leur ensemble. Cela permet en particulier d'apprécier l'adéquation entre les objectifs poursuivis dans l'évaluation et la méthode employée.

Nous défendons l'idée que les processus d'élaboration et de mise en œuvre d'une méthode d'évaluation des sols doivent commencer par une transcription des termes du problème à résoudre dans le cadre conceptuel. La première étape est la détermination des services que le commanditaire de l'étude souhaite évaluer, puis l'identification des bénéficiaires de ces services et des impacts sur les sols générés par les utilisateurs des sols d'étude. Les concepts pour réaliser cette première étape sont donnés dans la partie « utilisateurs du sol » du cadre conceptuel. Ensuite, avec les concepts de la partie « représentation du sol », il faut faire le lien entre ces services et les fonctions du sol, puis avec les propriétés et les processus du sol et les facteurs environnementaux à la base de la réalisation de ces fonctions. Enfin, les « concepts pour la quantification » permettent d'identifier la quantité à évaluer, qui doit être adaptée aux besoins du commanditaire. Nous en avons identifié trois : le niveau de remplissage d'une fonction, la capacité et le potentiel du sol pour une fonction. Elles peuvent ensuite être utilisées pour aborder d'autres questions, comme la compatibilité et la soutenabilité. Une fois passées ces étapes de compréhension et de questionnement autour du problème posé, l'élaboration ou le choix d'une méthode pour évaluer la quantité souhaitée peut commencer, en simplifiant si besoin la représentation du sol.

La revue de littérature sur l'évaluation des sols a permis de constater que la majeure partie des méthodes disponibles utilisent, souvent sans l'explicitier, la notion de capacité du sol pour une fonction. Cela peut s'expliquer par la difficulté méthodologique à aborder des notions comme le potentiel et le niveau de remplissage. Cependant, la capacité n'est pas adaptée pour aborder tous les problèmes que l'on peut chercher à résoudre par une évaluation des sols. Sa définition ne repose pas sur une quantité physique précise, ce qui mène à une grande variété de méthodologies, qui font intervenir une part de subjectivité dans le lien entre propriétés et fonctions et dans la définition de critères seuils pour juger d'une « bonne » ou « mauvaise » capacité. La revue bibliographique a aussi révélé des inconsistances dans la représentation du sol adoptée et dans la prise en compte ou non de facteurs environnementaux dans la capacité et le potentiel. Pour nous, les trois quantités ont leur intérêt.

A travers l'exemple d'application, nous avons montré l'intérêt d'évaluer un niveau de remplissage pour déterminer la compatibilité d'un usage à un sol. Cela a également permis d'illustrer les étapes de traduction du sujet dans les termes du cadre conceptuel, préalables à l'évaluation. Cet exemple pourrait être grandement amélioré en exploitant toutes les fonctionnalités du modèle utilisé, en raffinant le scénario d'étude et en augmentant le nombre de sols évalués.

Dans le contexte actuel de dégradation de la ressource en sol, l'objectif ultime d'une évaluation des sols est de permettre une meilleure gestion, une surveillance, et une protection de la ressource. Notre cadre conceptuel donne une vision d'ensemble du fonctionnement du sol et des conséquences de l'action humaine sur son fonctionnement. L'appropriation par les acteurs du territoire de ce cadre conceptuel comme base théorique minimale leur permettrait de mieux cerner les enjeux autour l'évaluation des sols.

Références

- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The Soil Management Assessment Framework. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), Article 6. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>
- Bagstad, K. J., Semmens, D. J., Waage, S., & Winthrop, R. (2013). A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. *Ecosystem Services*, 5, 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.07.004>
- Baize, D., & Girard, M.-C. (2008). *Référentiel pédologique 2008* (E. Quae, Éd.). Association française pour l'étude des sols (AFES). https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2017/11/Referentiel_Pedologique_2008.pdf
- Baveye, P. C., Baveye, J., & Gowdy, J. (2016). Soil “Ecosystem” Services and Natural Capital: Critical Appraisal of Research on Uncertain Ground. *Frontiers in Environmental Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00041>
- Bechler, K. & Toth, Oliver. (2010). *Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit, Leitfaden für Planungen und Gestattungsverfahren* (M. und N. B.-W. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Éd.). Verlagspublikation Umweltverwaltung Baden-Württemberg.
- Bock, M., Gasser, P.-Y., Pettapiece, W. W., Brierley, A. J., Bootsma, A., Schut, P., Neilsen, D., & Smith, C. A. S. (2018). The Land Suitability Rating System Is a Spatial Planning Tool to Assess Crop Suitability in Canada. *Frontiers in Environmental Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00077>
- Borghino, N., Corson, M., Nitschelm, L., Wilfart, A., Fleuet, J., Moraine, M., Breland, T. A., Lescoat, P., & Godinot, O. (2021). Contribution of LCA to decision making : A scenario analysis in territorial agricultural production systems. *Journal of Environmental Management*, 287, 112288. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112288>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., Deyn, G. D., Goede, R. de, Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., Groenigen, J. W. van, & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Calvaruso, C., Blanchart, A., Bertin, S., Grand, C., Pierart, A., & Eglin, T. (2021). Quels paramètres du sol mesurer pour évaluer les fonctions et les services écosystémiques associés ? Revue de la littérature et sélection de paramètres en ateliers participatifs. *Etude et Gestion des Sols*, 28(1), Article 1.
- Calzolari, C., Ungaro, F., Filippi, N., Guermandi, M., Malucelli, F., Marchi, N., Staffilani, F., & Tarocco, P. (2016). A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale. *Geoderma*, 261, 190-203. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.013>
- Celette, F., Ripoche, A., & Gary, C. (2010). WaLIS—A simple model to simulate water partitioning in a crop association : The example of an intercropped vineyard. *Agricultural Water Management*, 97(11), Article 11. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.008>
- Choquet, P., Gabrielle, B., Chalhoub, M., Michelin, J., Sauzet, O., Scammacca, O., Garnier, P., Baveye, P. C., & Montagne, D. (2021). Comparison of empirical and process-based modelling to quantify soil-supported ecosystem services on the Saclay plateau (France). *Ecosystem Services*, 50, 101332. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101332>

- Cosandey, C., Lavabre, J., Martin, C., & Mathys, N. (2005). Conséquences de la forêt méditerranéenne sur les écoulements des crues. *Forêt Méditerranéenne*, XXVI(2), Article 2.
- Costanza, R., d'Arge, R., Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, G., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R., Sutton, P., Belt, M., & Belt, H. (1996). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature Report of Workshop organised by NCEAS, Santa Barbara, Calif. (1996)*, 387.
- Cousin, I., Buis, S., Lagacherie, P., Doussan, C., Le Bas, C., & Guéris, M. (2022). Available water capacity from a multidisciplinary and multiscale viewpoint. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(3), Article 3. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00774-8>
- Creamer, R. E., Barel, J. M., Bongiorno, G., & Zwetsloot, M. J. (2022). The life of soils : Integrating the who and how of multifunctionality. *Soil Biology and Biochemistry*, 166, 108561. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108561>
- Danner, C., Hensold, C., Außendorf, M., Kraft, M., & Weidenbacher, A. (2003). *Das Schutzgut Boden in der Planung, Bewertung natürlicher Bodenfunktionen und Umsetzung in Planungs- und Genehmigungsverfahren* (B. L. für U. Bayerisches Geologisches Landesamt, Éd.). Ellwanger Bayreuth.
- Debeljak, M., Trajanov, A., Kuzmanovski, V., Schröder, J., Sandén, T., Spiegel, H., Wall, D. P., Van de Broek, M., Rutgers, M., Bampa, F., Creamer, R. E., & Henriksen, C. B. (2019). A Field-Scale Decision Support System for Assessment and Management of Soil Functions. *Frontiers in Environmental Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00115>
- Directorate-General for Environment. (2023). *DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law)*. European Commission.
- Dobarco, M. R., Cousin, I., Bas, C. L., & Martin, M. P. (2019). Pedotransfer functions for predicting available water capacity in French soils, their applicability domain and associated uncertainty. *Geoderma*, 336, 81-95. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.022>
- Dominati, E., Mackay, A., Green, S., & Patterson, M. (2014). A soil change-based methodology for the quantification and valuation of ecosystem services from agro-ecosystems: A case study of pastoral agriculture in New Zealand. *Ecological Economics*, 100, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.02.008>
- Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69(9), Article 9. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). *Defining and assessing soil quality* (B. A. S. W. Doran D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, Éd.; p. 3-21). SSSA, Madison. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1996). *Quantitative Indicators of Soil Quality : A Minimum Data Set* (A. J. J. John W. Doran, Éd.; p. 25-37). Soil Science Society of America, Madison.
- Ellili-Bargaoui, Y., Walter, C., Lemerrier, B., & Michot, D. (2021). Assessment of six soil ecosystem services by coupling simulation modelling and field measurement of soil properties. *Ecological Indicators*, 121, 107211. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107211>

- European Commission. (2002). *Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions : "Towards a thematic strategy for soil protection"*.
- European Environment Agency. (2023). *Soil monitoring in Europe : Indicators and thresholds for soil quality assessments*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/doi/10.2800/956606>
- Evangelista, S. J., Field, D. J., McBratney, A. B., Minasny, B., Ng, W., Padarian, J., Dobarco, M. R., & Wadoux, A. M. J.-C. (2023). A proposal for the assessment of soil security : Soil functions, soil services and threats to soil. *Soil Security*, 10, 100086. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2023.100086>
- FAO. (2015). *Status of the World's Soil Resources : Main Report* (FAO, Éd.).
- FAO. (2021). *L'état des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde—Des systèmes au bord de la rupture. Rapport de synthèse* (FAO, Éd.). <https://doi.org/10.4060/cb7654fr>
- Fernández, M. P., Keshavarzi, A., Rodrigo-Comino, J., Schnabel, S., Contador, J. F. L., Gutiérrez, Á. G., Parra, F. J. L., González, J. B., Torreño, A. A., & Cerdà, A. (2020). Developing scoring functions to assess soil quality at a regional scale in rangelands of SW Spain. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20200090>
- Francesconi, W., Srinivasan, R., Pérez-Miñana, E., Willcock, S. P., & Quintero, M. (2016). Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model ecosystem services : A systematic review. *Journal of Hydrology*, 535, 625-636. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.034>
- Gambetta, G. A., Herrera, J. C., Dayer, S., Feng, Q., Hochberg, U., & Castellarin, S. D. (2020). Corrigendum to : The physiology of drought stress in grapevine : Towards an integrative definition of drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 71(18), 5717-5717. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa313>
- Garrigues, E., Corson, M. S., Angers, D. A., Werf, H. M. G. van der, & Walter, C. (2012). Soil quality in Life Cycle Assessment : Towards development of an indicator. *Ecological Indicators*, 18, 434-442. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.12.014>
- Greiner, L., Keller, A., Grêt-Regamey, A., & Papritz, A. (2017). Soil function assessment : Review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. *Land Use Policy*, 69, 224-237. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.025>
- Greiner, L., Nussbaum, M., Papritz, A., Fraefel, M., Zimmermann, S., Schwab, P., Grêt-Regamey, A., & Keller, A. (2018). Assessment of soil multi-functionality to support the sustainable use of soil resources on the Swiss Plateau. *Geoderma Regional*, 14, e00181. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00181>
- Grizzetti, B., LanzaNova, D., Liqueste, C., Reynaud, A., & Cardoso, A. C. (2016). Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environmental Science & Policy*, 61, 194-203. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.04.008>
- Hackbart, V. C. S., Lima, G. T. N. P. de, & Santos, R. F. dos. (2017). Theory and practice of water ecosystem services valuation : Where are we going? *Ecosystem Services*, 23, 218-227. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.12.010>
- Harris, R. F., Karlen, D. L., & Mulla, D. J. (1996). *A Conceptual Framework for Assessment and Management of Soil Quality and Health* (A. J. J. John W. Doran, Éd.; p. 61-82). Soil Science Society of America, Madison.

- Herbreteau, A. (2021). *Validation d'une typologie de sols simplifiée sur un bassin versant viticole méditerranéen—Rapport de stage*.
- Huber, S., Prokop, G., Arrouays, D., Banko, G., Bispo, A., R.J.A., J., Kibblewhite, M., Lexer, W., Moeller, A., Rickson, R., Shishkov, T., M., S., Tóth, G., Akker, J., G., V., Verheijen, F., & Jones, A. (2008). *Environmental Assessment of Soil for Monitoring : Volume I Indicators & Criteria*.
- IUSS Working Group WRB. (2015). *Base de référence mondiale pour les ressources en sol 2014, Mise à jour 2015, Système international de classification des sols pour nommer les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques*. FAO, Rome.
- Jax, K. (2005). Function and “functioning” in ecology : What does it mean? *Oikos*, *111*(3), 641-648. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2005.13851.x>
- Jónsson, J. Ö. G., & Davíðsdóttir, B. (2016). Classification and valuation of soil ecosystem services. *Agricultural Systems*, *145*, 24-38. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.02.010>
- Jost, E., Schönhart, M., Skalský, R., Balkovič, J., Schmid, E., & Mitter, H. (2021). Dynamic soil functions assessment employing land use and climate scenarios at regional scale. *Journal of Environmental Management*, *287*, 112318. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112318>
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil Quality : A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Science Society of America Journal*, *61*(1), Article 1. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>
- Karlen, D. L., & Stott, D. E. (1994). *A Framework for Evaluating Physical and Chemical Indicators of Soil Quality* (B. A. S. W. Doran D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, Éd.; p. 53-72). SSSA, Madison.
- Koch, A., McBratney, A., Adams, M., Field, D., Hill, R., Crawford, J., Minasny, B., Lal, R., Abbott, L., O'Donnell, A., Angers, D., Baldock, J., & Bar, E. (2013). Soil Security : Solving the Global Soil Crisis. *Global Policy*, *4*(4), Article 4.
- Lehmann, A., David, S., & Stahr, K. (2013). *TUSEC - Bilingual-Edition : Eine Methode zur Bewertung natürlicher und anthropogener Böden (Deutsche Fassung)*. Kommunikations-, Informations- und Medienzentrum der Universität Hohenheim.
- McBratney, A., Field, D. J., & Koch, A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, *213*, 203-213. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>
- Moebius-Clune, B. N., Moebius-Clune, D. J., Gugino, B. K., Idowu, O. J., Schindelbeck, R. R., Ristow, A. J., Es, H. M. van, Thies, J. E., Shayler, H. A., McBride, M. B., Kurtz, K. S. M., Wolfe, D. W., & Abawi, G. S. (2016). *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework (3.2)*. Cornell University.
- Montagne, D., Cousin, I., & Cornu, S. (2013). Dégradation morphologique et agriculture : Quantification des évolutions pédologiques à court terme sous contraintes anthropiques. *Étude et Gestion des Sols*, *20*(2), 137-149.
- Mueller, L., Schindler, U., Behrendt, A., Eulenstein, F., Dannowski, R., Schindwein, S. L., Shepherd, T. G., Smolentseva, E., & Rogasik, J. (2007). *The Muencheberg Soil Quality Rating (SQR). Field Manual for Detecting and Assessing Properties and Limitations of Soils for Cropping and Grazing*.
- Natural Capital Project. (2022). *INVEST 3.13.0.post5+ug.gce76c6e User's Guide*. Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, and Stockholm Resilience Centre.

- Naulleau, A. (2021). *Co-construction et évaluation de stratégies d'adaptation au changement climatique d'un vignoble méditerranéen* [Theses, Institut Agro Montpellier; Université de Montpellier (UM), FRA]. <https://hal.inrae.fr/tel-03562565>
- Nedkov, S., Campagne, S., Borisova, B., Krpec, P., Prodanova, H., Kokkoris, I. P., Hristova, D., Clec'h, S. L., Santos-Martin, F., Burkhard, B., Bekri, E. S., Stoycheva, V., Bruzón, A. G., & Dimopoulos, P. (2022). Modeling water regulation ecosystem services: A review in the context of ecosystem accounting. *Ecosystem Services*, *56*, 101458. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101458>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation—Version 2009*. Grassland, Soil and Water research laboratory, Agricultural research Service, Temple, Texas.
- Nie, W., Guo, H., & Banwart, S. A. (2021). Economic valuation of Earth's critical zone: Framework, theory and methods. *Environmental Development*, *40*, 100654. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2021.100654>
- Nitschelm, L., Aubin, J., Corson, M. S., Viaud, V., & Walter, C. (2016). Spatial differentiation in Life Cycle Assessment LCA applied to an agricultural territory: Current practices and method development. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 2472-2484. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.138>
- Oberholzer, H.-R., Knuchel, R. F., Weisskopf, P., & Gaillard, G. (2012). A novel method for soil quality in life cycle assessment using several soil indicators. *Agronomy for Sustainable Development*, *32*(3), Article 3. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0072-7>
- Ojeda, H., & Saurin, N. (2014). L'irrigation de précision de la vigne: Méthodes, outils et stratégies pour maximiser la qualité et les rendements de la vendange en économisant de l'eau. *Innovations Agronomiques*, *38*, 97-108.
- Pare, N., Andrieux, P., Louchart, X., Biarnes, A., & Voltz, M. (2011). Predicting the spatio-temporal dynamic of soil surface characteristics after tillage. *Soil and Tillage Research*, *114*(2), 135-145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.04.003>
- Payraudeau, S., & van der Werf, H. M. G. (2005). Environmental impact assessment for a farming region: A review of methods. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *107*(1), Article 1. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.12.012>
- Rabot, E., Guirese, M., Pittatore, Y., Angelini, M., Keller, C., & Lagacherie, P. (2022). Development and spatialization of a soil potential multifunctionality index for agriculture (Agri-SPMI) at the regional scale. Case study in the Occitanie region (France). *Soil Security*, *6*, 100034. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100034>
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H.-J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, *314*, 122-137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weidema, B. P., & Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, *30*(5), Article 5. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>
- Renault, P., Cousin, I., Gascuel-Oudou, C., Antoni, V., Bispo, A., Bougon, N., Desrousseaux, M., Feix, I., Joassard, I., Laville, P., Pierart, A., & Caquet, T. (2023). Des propriétés des sols aux indicateurs de la qualité des sols, en appui aux politiques publiques et en réponse aux besoins de la société. *Etude et Gestion des Sols*, *30*, 207-221.

- Sandén, T., Trajanov, A., Spiegel, H., Kuzmanovski, V., Saby, N. P. A., Picaud, C., Henriksen, C. B., & Debeljak, M. (2019). Development of an Agricultural Primary Productivity Decision Support Model: A Case Study in France. *Frontiers in Environmental Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00058>
- Seybold, C. A., Mansbach, M. J., Karlen, D. L., & Rogers, H. H. (1997). Quantification of Soil Quality. In R. Lal, J. M. Kimble, R. F. Follett, & B. A. Stewart (Éds.), *Soil Processes and the Carbon Cycle* (1^{re} éd., p. 387-404). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203739273-27>
- Soil Survey Staff. (1999). *Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys, 2nd edition*. (Natural Resources Conservation, Éd.). Agricultural Handbook.
- Therond, O. (coord), Tichit, M. (coord), Tibi, A. (coord), Bas, C. L., Bissonais, Y. L., Lelièvre, V., Lifran, R., Maigné, E., Martin, G., Martin, R., Martin-Laurent, F., Martinet, V., McLaughlin, O., Meillet, A., Mignolet, C., Mouchet, M., Nozières-Petit, M.-O., Ostermann, O. P., Paracchini, M. L., ... Tardieu, L. (2017). *Volet « écosystèmes agricoles » de l'Evaluation Française des Ecosystèmes et des Services Ecosystémiques* (INRA, Éd.).
- Thoumazeau, A., Bessou, C., Renevier, M.-S., Panklang, P., Puttaso, P., Peerawat, M., Heepngoen, P., Polwong, P., Koonklang, N., Sdoodee, S., Chantuma, P., Lawongsa, P., Nimkingrat, P., Thaler, P., Gay, F., & Brauman, A. (2019). Biofunctool®: A new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part B: investigating the impact of land management of rubber plantations on soil quality with the Biofunctool® index. *Ecological Indicators*, 97, 429-437. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.028>
- Thoumazeau, A., Bessou, C., Renevier, M.-S., Trap, J., Marichal, R., Mareschal, L., Decaëns, T., Bottinelli, N., Jaillard, B., Chevallier, T., Suvannang, N., Sajjaphan, K., Thaler, P., Gay, F., & Brauman, A. (2019). Biofunctool®: A new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: concept and validation of the set of indicators. *Ecological Indicators*, 97, 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.023>
- Tibi, A., & Therond, O. (2018). *Services écosystémiques fournis par les espaces agricoles*. éditions Quae. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-2917-8>
- Vogel, H.-J., Eberhardt, E., Franko, U., Lang, B., Ließ, M., Weller, U., Wiesmeier, M., & Wollschläger, U. (2019). Quantitative Evaluation of Soil Functions: Potential and State. *Frontiers in Environmental Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00164>
- Vrebos, D., Jones, A., Lugato, E., O'Sullivan, L., Schulte, R., Staes, J., & Meire, P. (2021). Spatial evaluation and trade-off analysis of soil functions through Bayesian networks. *European Journal of Soil Science*, 72(4), Article 4. <https://doi.org/10.1111/ejss.13039>
- Wall, D. P., Delgado, A., O'Sullivan, L., Creamer, R. E., Trajanov, A., Kuzmanovski, V., Bugge Henriksen, C., & Debeljak, M. (2020). A Decision Support Model for Assessing the Water Regulation and Purification Potential of Agricultural Soils Across Europe. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00115>

Annexes**Liste des annexes**

Annexe 1 : complément du cadre conceptuel : glossaire	47
Annexe 2 : Complément à la revue bibliographique : résultats de recherche sur le Web Of Science	50
Annexe 3 : schéma de fonctionnement de WaLIS	64
Annexe 4 : paramètres d'entrée des simulations sur WaLIS.....	65
Annexe 5 : positionnement du cadre conceptuel dans la littérature	67
Annexe 6 : sortie terrain dans le bassin-versant du Rieutort : caractérisation des sols des parcelles expérimentales – compte-rendu	75

Liste des figures en annexe

Figure 13 : les deux compartiments du sol dans le modèle WaLIS, (tiré de Celette et al., 2010).....	64
Figure 14 : Localisation du bassin versant du Rieutort à l'Ouest de Montpellier et au Nord de Béziers (gauche). Localisation des parcelles et des sondages dans le bassin versant du Rieutort (contours en bleu) (droite). Fond des cartes : openstreetmap	75
Figure 15 : localisation des sondages sur la carte géologique au 1/50 000 (gauche) et matériaux géologiques des différentes parcelles obtenus par un repérage sur la carte.	76
Figure 16 : triangle des textures GEPPA utilisé dans la description des sols, récupéré de Herbreteau (2021) (haut) ; exemple de fiche de description des sols utilisée sur le terrain (bas).....	81
Figure 17 : localisation de la parcelle et du sondage 1 (en haut à gauche), photo de la parcelle 1 (en bas à gauche, qui n'est pas exactement la parcelle 1, voir la présentation) et du sondage à la tarière (droite).....	83
Figure 18 : localisation des parcelles et des sondages 2 et 3 (gauche), photo de la parcelle 2 (centre) et du sondage à la tarière correspondant (droite).....	84
Figure 19 : photographie aérienne de la parcelle 2 (google maps), sur laquelle les deux systèmes pédologiques sont clairement délimités par la couleur du sol.	84
Figure 20 : photo de la parcelle 3 (gauche) et du sondage à la tarière correspondant (droite).....	86
Figure 21 : localisation de la parcelle 4 (gauche) et sondage à la tarière correspondant (droite). (Par négligence de l'auteur, il manque pour ce sondage une photo de la parcelle.)	87
Figure 22 : localisation de la parcelle 5 (en haut à gauche), photo de la parcelle (en bas à gauche), et photo du sondage correspondant (droite).	88
Figure 23 localisation de la parcelle 7 (en haut à gauche), photo de la parcelle (en haut à droite), photo du sondage correspondant (en bas à gauche, la photo a été prise à l'envers, d'où la perspective étrange) et photo d'un affleurement calcaire sous les arbres en haut de la parcelle (en bas à droite).	90
Figure 24 : localisation des parcelles 9 et 10 (en haut à gauche), photo de la parcelle 9 (en haut au centre), et photo du sol de la parcelle 9 (en haut à droite), photo de la parcelle 10 (en bas à gauche) et du sondage correspondant (en bas à droite).....	91

Liste des tableaux en annexe

Tableau 5 : publications sélectionnées parmi les 750 papiers avec les critères de base, mais non retenus pour la revue finale. En rouge, on surligne les papiers utilisant la méthode des fonctions scores, et en vert un papier au début inclut dans la revue, lu en entier, et finalement rejeté.	50
Tableau 6 : papiers remplissant les critères de sélection mais non inclus dans la revue car utilisant les outils présentés dans certaines publications de la revue. En vert : Biofunctool® (Thoumazeau et al., 2019) ; en bleu clair : SMAF (Soil management assessment Framework, Andrews et al., 2004) ; en bleu foncé : soil navigator (Debeljak et al., 2019) ; en jaune : Cornel Soil Health Test (Moebius-Clune et al., 2016).	52
Tableau 7 : papiers sélectionnés pour la revue à partir des résultats de recherche sur Web Of Science. En vert, on indique les articles qui ont été revus.	53
Tableau 8 : publications additionnelles incluses dans la revue bibliographique (en vert celles qui ont été revues).....	54
Tableau 9 : paramètres du modèle communs aux deux parcelles.....	65
Tableau 10 : paramètres du modèles spécifiques à chaque parcelle	66
Tableau 11 : comparaison des différentes conceptions des termes « qualité » et « santé » qui structurent la pensée actuelle autour de ces termes.	68
Tableau 12 : correspondance entre les concepts de notre cadre conceptuel et ceux de Vogel et al. (2019). En italique, on indique les recoupements partiels.	71
Tableau 13 : correspondance des concepts entre la sécurité des sols et notre cadre conceptuel. En rouge, on indique les termes qui n'ont pas d'équivalents dans l'un ou l'autre cadre.	72
Tableau 14 : correspondance des concepts entre le capital naturel des sols (Dominati et al. 2010) et notre cadre conceptuel. En italique, on indique les recoupements partiels.	73
Tableau 15 : unité cartographique sur la carte au 1/100000 des sondages réalisés, et rattachement à partir des observations de terrain à ces unités.	77

Annexe 1 : complément du cadre conceptuel : glossaire

Le glossaire reprend les définitions de chaque terme souligné dans le cadre conceptuel.

Cadre conceptuel pour l'évaluation des fonctions des sols : ensemble de définitions et d'outils de réflexion pour aborder l'évaluation des fonctions des sols.

1. Représentation du sol

Représentation du sol : tentative de décomposer le sol en éléments distincts et que l'on peut relier pour expliquer le fonctionnement du sol de manière simplifiée.

Sol : « le sol est un volume constitué de solides (minéraux et matières organiques), de liquides et de gaz situé à la surface de la Terre et caractérisé par : des horizons qui se différencient du matériau initial sous l'addition, la perte, le transfert et la transformation d'énergie et de matière, ou alors la capacité de supporter des plantes enracinées dans un environnement naturel. » (Soil Survey Staff, 1999). Le Soil Survey Staff fixe également une profondeur maximale à la définition du sol : 2m.

Propriétés du sol : caractéristiques ou constituants des sols qui peuvent être mesurés. Elles sont utilisées pour décrire le sol.

Propriété inhérente : propriété stable dans un contexte naturel sur l'échelle d'une vie humaine (ex : la texture, la pierrosité).

Propriété dynamique : propriété du sol qui évolue sur des échelles de court-moyen terme. Certaines propriétés dynamiques évoluent cycliquement sur une année (ex : état de surface), et pour d'autres l'évolution s'apprécie sur des temps plus longs (taux de matière organique stable).

Facteurs environnementaux : facteurs naturels à l'origine de flux entrants dans les sols ou conditionnant des flux sortants des sols (ex : climat, nature du matériau sous-jacent).

Processus : mécanismes et actions qui se déroulent dans les sols par interaction entre les différents constituants (eau, phases minérales, air) et les organismes vivants (ex : minéralisation de la matière organique, adsorption d'un pesticide sur un argile). Les processus peuvent être agrégés, c'est-à-dire décomposables en des processus élémentaires (par exemple la minéralisation de la matière organique).

Organismes du sol : tous les organismes qui vivent (en partie) dans le sol. Ils en affectent les propriétés et les processus.

Fonctionnement du sol : ensemble des processus et des liens de causalité et de dépendance entre ces processus et avec les propriétés, les organismes, et les facteurs extérieurs qui interviennent dans ces processus. Comprendre le fonctionnement du sol, c'est faire le lien entre différents événements, les propriétés des sols, les organismes, etc.

Fonction du sol : ce que fait le sol indépendamment de tout intérêt humain. Les fonctions sont le résultat des processus du sol. On peut les voir comme des flux (flux d'eau du sol à la plante) ou comme des conséquences de certains processus ou certaines propriétés : un sol riche en matière organique fournit des habitats à de nombreuses espèces microbiennes. Mais ce sont des processus (microbiens), comme la reproduction, qui sont à l'origine de la fonction : le sol fournit des habitats car les organismes qui s'y implantent s'y reproduisent, parce que les conditions du milieu le permettent.

Catégories de fonctions : ensemble de fonctions que l'on peut regrouper pour leur similitudes (ex : purification et régulation de l'eau pour les fonctions liées à l'eau).

2. Les utilisateurs du sol

Commanditaire : personne qui souhaite réaliser une évaluation, ou à qui l'évaluation est adressée.

Service écosystémique : bénéfices que l'on obtient des écosystèmes (Costanza et al., 1996). Le sol remplit des fonctions, et les services sont les bénéfices que l'on peut en tirer.

Bénéficiaire : personne à qui la réalisation d'un service par le sol profite. Un bénéficiaire peut s'ignorer (ne pas savoir qu'il tire son bénéfice du sol). Il peut être direct ou indirect, selon qu'il tire un revenu des services écosystémiques ou non.

Acteur du territoire : individus qui gèrent le sol à différentes échelles. Leurs décisions impactent les flux entrants et sortants, ainsi que les propriétés du sol et de leur environnement.

Utilisateur du sol : acteur du territoire qui agit directement sur le sol (il est en général un bénéficiaire direct, il peut être ou non un commanditaire). Il y a un petit conflit sur le terme utilisateur, qui peut aussi désigner, de manière plus générale les bénéficiaires, les commanditaires, et les acteurs du territoire.

Facteur anthropique : toute intervention humaine sur les sols.

Forçage anthropique : conséquences des facteurs anthropiques sur le fonctionnement du sol.

Facteurs extérieurs : ensemble des facteurs environnementaux et anthropiques.

Usage du sol : type de végétation qui pousse sur les sols et lien éventuel avec des bénéfices attendus (ex : blé, pour production agricole).

Pratiques agricoles/culturelles : interventions qui ont des impacts sur le sol, implémentées pour augmenter ou permettre la fourniture de services.

3. Concepts pour la quantification

Niveau de remplissage : quantité de la fonction qui est réalisée pendant une durée donnée (flux total pour des fonctions définies comme des flux, ex : quantité d'eau qui s'infiltré dans le sol sur une année).

Capacité du sol : capacité du sol à remplir une fonction indépendamment de son usage, déterminée par les propriétés du sol et les caractéristiques de l'environnement.

Potentiel du sol : composante intrinsèque de la capacité du sol, qui est déterminée par les propriétés inhérentes et les caractéristiques de l'environnement stables à échelle de temps humaines.

Dégradation : toute diminution de la capacité ou du potentiel du sol.

Amélioration du sol : toute augmentation de la capacité (voire du potentiel) du sol.

Soutenabilité d'un usage : se dit d'un usage qui n'entraîne pas de dégradation du sol.

Etat du sol : valeur des propriétés du sol et des caractéristiques de son environnement à un instant donné. Un état est donc également caractérisé par une capacité et un potentiel. On peut parler d'état actuel, passé, futur, projeté pour un usage, un scénario, etc.

Compatibilité à un usage : satisfaction par les sols d'un ensemble de critères d'aptitude définis par les acteurs du territoire.

Multifonctionnalité du sol : terme employé pour souligner que les sols ne sont pas seulement un support pour les plantes et les infrastructures humaines, mais remplissent de nombreuses autres fonctions. Il y a toujours une réalisation simultanée de plusieurs fonctions par les sols, et donc des bénéficiaires éventuels différents.

Références

Costanza, R., d'Arge, R., Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, G., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R., Sutton, P., Belt, M., & Belt, H. (1996). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*. Report of Workshop organised by NCEAS, Santa Barbara, Calif. (1996)., 387.

Soil Survey Staff. (1999). *Soil Taxonomy : A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*, 2nd edition. (Natural Resources Conservation, Éd.). Agricultural Handbook.

Annexe 2 : Complément à la revue bibliographique : résultats de recherche sur le Web Of Science

Tableaux récapitulatifs

Tableau 5 : publications sélectionnées parmi les 750 papiers avec les critères de base, mais non retenus pour la revue finale. En rouge, on surligne les papiers utilisant la méthode des fonctions scores, et en vert un papier au début inclut dans la revue, lu en entier, et finalement rejeté.

Papiers non inclus dans la revue finale		
Référence	Titre	Commentaire
Volchko et al 2014	Using soil function evaluation in multi-criteria decision analysis for sustainability appraisal of remediation alternatives	Fonctions scores (description des seuils dans un autre article) puis indice de qualité
Velasquez and Lavelle 2019	Soil macrofauna as an indicator for evaluating soil based ecosystem services in agricultural landscapes	Lien macrofaune/propriétés et pas macrofaune/fonctions
Raiesi and Beheshti 2022	Evaluating forest soil quality after deforestation and loss of ecosystem services using network analysis and factor analysis techniques	Méthode des fonctions scores
Volchko et al. 2014b	A minimum data set for evaluating the ecological soil functions in remediation projects	Méthode des fonctions scores
Munoz-Rojas et al. 2016	Soil quality indicators to assess functionality of restored soils in degraded semiarid ecosystems	Pas de lien avec les fonctions du sol
Fernandez et al 2020	Developing scoring functions to assess soil quality at a regional scale in rangelands of SW Spain	Méthode des fonctions scores
Bujnovsky 2000	Towards the soil quality evaluation	Non accessible
Zornoza et al. 2007	Evaluation of soil quality using multiple lineal regression based on physical, chemical and biochemical properties	Régression linéaire pour estimer des paramètres qui soit-disant sont lié à la qualité
Sharma et al. 2008	Evaluation of long-term soil management practices using key indicators and soil quality indices in a semi-arid tropical Alfisol	Méthode des fonctions scores
Masto et al. 2008	Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India	Méthode des fonctions scores
Bell and Raczkowski 2008	Soil property indices for assessing short-term changes in soil quality	Pas de lien avec les fonctions du sol
Masto et al. 2008b	Soil quality indices for evaluation of long-term land use and soil management practices in semi-arid sub-tropical india	Méthode des fonctions scores
Virto et al. 2012	Soil quality evaluation following the implementation of permanent cover crops in semi-arid vineyards. Organic matter, physical and biological soil properties	Début de méthode des fonctions scores
Paz-Kagan et al. 2014	Evaluation of ecosystem responses to land-use change using soil quality and primary productivity in a semi-arid area, Israel	Méthode des fonctions scores
Askari and Holden 2014	Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management	Méthode des fonctions scores
Askari and Holden 2015	Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems	Méthode des fonctions scores
Firdous et al. 2016	Assessment of soil quality parameters using multivariate analysis in the Rawal Lake watershed	Pas de lien avec les fonctions du sol (PCA sur des propriétés)
Obriot et al. 2016	Multi-criteria indices to evaluate the effects of repeated organic amendment applications on soil and crop quality	Méthode des fonctions scores
Mishra et al. 2017	Soil quality assessment under shifting cultivation and forests in North Eastern Himalaya of India	Méthode des fonctions scores
Raiesi 2017	A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions	Méthode des fonctions scores
Bilgili et al. 2017	Assessment of the quality of the Harran Plain soils under long-term cultivation	Méthode des fonctions scores
Nabiollahi et al. 2017	Assessing and monitoring the soil quality of forested and agricultural areas using soil-quality indices and digital soil-mapping in a semi-arid environment	Méthode des fonctions scores
Yu et al. 2018	Selecting the minimum data set and quantitative soil quality indexing of alkaline soils under different land uses in northeastern China	Méthode des fonctions scores
Rekik et al. 2018	Soil health assessment for coffee farms on andosols in Colombia	Méthode des fonctions scores

Papiers non inclus dans la revue finale		
Référence	Titre	Commentaire
Dai et al. 2018	Assessing Soil Quality for Sustainable Cropland Management Based on Factor Analysis and Fuzzy Sets: A Case Study in the Lhasa River Valley, Tibetan Plateau	Méthode des fonctions scores
Geng et al. 2018	Using Soil Survey Database to Assess Soil Quality in the Heterogeneous Taihang Mountains, North China	Méthode des fonctions scores
Triantafyllidis et al. 2018	An Assessment of the Soil Quality Index in a Mediterranean Agro Ecosystem	Méthode des fonctions scores
Xue et al. 2019	A new method for soil health assessment based on Analytic Hierarchy Process and meta-analysis	Méthode des fonctions scores
Chahal and Van Eerd 2019	Quantifying soil quality in a horticultural-cover cropping system	Méthode des fonctions scores
Imamoglu and Dengiz 2019	Evaluation of soil quality index to assess the influence of soil degradation and desertification process in sub-arid terrestrial ecosystem	Pas de lien avec les fonctions du sol, scorage par seuils des propriétés ou indicateurs
Dengiz et al. 2020	Assessment of Soil Quality Index for Tea Cultivated Soils in Ortaçay Micro Catchment in Black Sea Region	Méthode des fonctions scores
Shao et al. 2020	Soil quality assessment under different forest types in the Mount Tai, central Eastern China	Méthode des fonctions scores
Gayan et al. 2020	Assessment of soil quality indicators under rice ecosystem of Assam, India	Méthode des fonctions scores
Karaca et al. 2021	An assessment of pasture soils quality based on multi-indicator weighting approaches in semi-arid ecosystem	Méthode des fonctions scores
Raiesi and Pajman 2021	Assessment of post-wildfire soil quality and its recovery in semi-arid upland rangelands in Central Iran through selecting the minimum data set and quantitative soil quality index	Méthode des fonctions scores
dos Santos et al. 2021	Soil quality assessment using erosion-sensitive indices and fuzzy membership under different cropping systems on a Ferralsol in Brazil	Méthode des fonctions scores
Sadiq et al. 2021	Evaluating quality of soils formed on basement complex rocks in Kaduna State, northern Guinea savanna of Nigeria	Méthode des fonctions scores
Simoes-Mota et al. 2021	Soil Quality Assessment after 25 Years of Sewage Sludge vs. Mineral Fertilization in a Calcareous Soil	Pas de lien avec les fonctions du sol
Mazzon et al. 2021	Conventional versus organic management: application of simple and complex indexes to assess soil quality	Méthode des fonctions scores
Saleh et al. 2021	Evaluation of Soil Quality in Arid Western Fringes of the Nile Delta for Sustainable Agriculture	Méthode des fonctions scores
Santos-Frances et al. 2021	Soil Quality and Evaluation of Spatial Variability in a Semi-Arid Ecosystem in a Region of the Southeastern Iberian Peninsula (Spain)	Méthode des fonctions scores
Taghipour et al. 2022	Assessing changes in soil quality between protected and degraded forests using digital soil mapping for semiarid oak forests, Iran	Méthode des fonctions scores
Zhang et al. 2022	A novel optimal data set approach for erosion-impacted soil quality assessments—A case-study of an agricultural catchment in the Chernozem region of Northeast China	Méthode des fonctions scores
Gao et al. 2022	Soil C:N:P Stoichiometric Characteristics and Soil Quality Evaluation under Different Restoration Modes in the Loess Region of Northern Shaanxi Province	Méthode des fonctions scores
Wei et al. 2022	Soil health evaluation approaches along a reclamation consequence in Hangzhou Bay, China	Pas de lien avec les fonctions du sol
Ye et al. 2022	Establishing a soil quality index to assess the effect of thinning on soil quality in a Chinese fir plantation	Non accessible
Wu et al. 2022	Soil Quality Assessment and Management in Karst Rocky Desertification Ecosystem of Southwest China	Méthode des fonctions scores
Zhang et al. 2022	Soil Quality Assessment in Farmland of a Rapidly Industrializing Area in the Yangtze Delta, China	Pas de lien avec les fonctions du sol
Cao et al. 2023	Soil health assessment in the Yangtze River Delta of China: Method development and application in orchards	Méthode des fonctions scores
Saygin et al. 2023	Soil quality assessment based on hybrid computational approach with spatial multi-criteria analysis and geographical information system for sustainable tea cultivation	Non accessible
Tejashvini et al. 2023	Soil quality assessment of different land use systems of peri-urban-rural landscape of Deccan plateau, hot semi-arid agro-ecosystem	Non accessible

Papiers non inclus dans la revue finale		
Référence	Titre	Commentaire
Negis et al. 2023	Establishment of a minimum dataset and soil quality assessment for multiple reclaimed areas on a wind-eroded region	Méthode des fonctions scores
Zwetsloot et al. 2022	A flexible selection tool for the inclusion of soil biology methods in the assessment of soil multifunctionality	Biological Soil Information System (BIOSIS). Pas une méthode d'évaluation, mais une aide à la sélection d'indicateurs

Tableau 6 : papiers remplissant les critères de sélection mais non inclus dans la revue car utilisant les outils présentés dans certaines publications de la revue. En vert : Biofunctool® (Thoumazeau et al., 2019) ; en bleu clair : SMAF (Soil management assessment Framework, Andrews et al., 2004) ; en bleu foncé : soil navigator (Debeljak et al., 2019) ; en jaune : Cornel Soil Health Test (Moebius-Clune et al., 2016).

Papiers sélectionnés à partir de la recherche sur Web Of Science et utilisant des outils d'évaluation existants (non revus)		
Référence	Titre	Commentaire
Pheap et al 2019	Multi-functional assessment of soil health under Conservation Agriculture in Cambodia	Utilisation de Biofunctool
Schaber et al 2022	Soil function assessment in high-mountain environments: Testing the SEPP tool in a ski resort in the Italian Alps	Utilisation de SEPP, non inclus car concerne les sols alpins
Gruber et al. 2018	How and to What Extent Does Topography Control the Results of Soil Function Assessment: A Case Study From the Alps in South Tyrol (Italy)	Utilisation de SEPP
Cambardella et al. 2004	Watershed-scale assessment of soil quality in the loess hills of southwest Iowa	Utilisation du SMAF
Karlen et al. 2008	A preliminary watershed scale soil quality assessment in north central Iowa, USA	Utilisation du SMAF
Schindelbeck et al. 2008	Comprehensive assessment of soil quality for landscape and urban management	Utilisation du Cornel Soil Health Test
Ozgoz et al. 2013	Soil quality and spatial variability assessment of land use effects in a typic haplustoll	Utilisation du SMAF
Bhaduri and Purakayastha 2014	Long-term tillage, water and nutrient management in rice-wheat cropping system: Assessment and response of soil quality	Utilisation du SMAF
Swanepoel et al. 2015	Assessment of tillage effects on soil quality of pastures in South Africa with indexing methods	Utilisation du SMAF
Cherubin et al 2016	A Soil Management Assessment Framework (SMAF) Evaluation of Brazilian Sugarcane Expansion on Soil Quality	Utilisation du SMAF
Cherubin et al. 2017	Soil Quality Evaluation Using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian Oxisols with Contrasting Texture	Utilisation du SMAF
Seker et al. 2017	Assessment of soil quality index for wheat and sugar beet cropping systems on an entisol in Central Anatolia	Utilisation du SMAF et du Cornel Soil Health Test
Da Luz et al. 2019	Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil	Utilisation du SMAF
Vasquez et al. 2021	Assessing multifunctionality of agricultural soils: Reducing the biodiversity trade-off	Utilisation du Soil Navigator
Heepngoan et al. 2021	Relationships between physico-chemical, biological and functional approaches for soil quality assessment. A case study along a gradient of disturbance	Utilisation de Biofunctool
Ye et al. 2021	Soil health assessment after 40 years of conservation and conventional tillage management in Southeastern Coastal Plain soils	Utilisation du SMAF et du Cornel Soil Health Test
Bermeo et al. 2022	Evaluating soil quality in silvopastoral systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in the Colombian Amazon	Utilisation du SMAF
Jimenez et al. 2022	Applying the Soil Management Assessment Framework (SMAF) to Assess Mangrove Soil Quality	Utilisation du SMAF

Tableau 7 : papiers sélectionnés pour la revue à partir des résultats de recherche sur Web Of Science. En vert, on indique les articles qui ont été revus.

Papiers sélectionnés pour la revue finale à partir des résultats de recherche sur Web Of Science		
Référence	Titre	Commentaire
Haslmayr et al. 2016	Soil function evaluation in Austria — Development, concepts and examples	
Lima et al. 2013	A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality	Utilisation d'un indice de qualité unique
Zhao and Wu 2021	Soil Health Evaluation of Farmland Based on Functional Soil Management—A Case Study of Yixing City, Jiangsu Province, China	
Koschel and Lennartz 2021	GIS-basierte Bewertung natürlicher Bodenfunktionen am Beispiel der Regiopole Region Rostock	Méthode similaire à Danner, Bechler, etc
Valuveja et al. 2020	Assessment of Soil Functions: An Example of Meeting Competing National and International Obligations by Harnessing Regional Differences	Quantification de la demande et de l'offre en fonctions
Dingkuhn et al. 2020	A multi-method approach for the integrative assessment of soil functions: Application on a coastal mountainous site of the Philippines	Quantification de la demande et de l'offre en fonctions
Debeljak et al. 2019	A Field-Scale Decision Support System for Assessment and Management of Soil Functions	
Greiner et al. 2018	Assessment of soil multi-functionality to support the sustainable use of soil resources on the Swiss Plateau	
Jost et al 2021	Dynamic soil functions assessment employing land use and climate scenarios at regional scale	
Vrebos et al. 2021	Spatial evaluation and trade-off analysis of soil functions through Bayesian networks	
Ellili-Bargaoui et al. 2021	Assessment of six soil ecosystem services by coupling simulation modelling and field measurement of soil properties	Modélisation
Dominati et al. 2014	A soil change-based methodology for the quantification and valuation of ecosystem services from agro-ecosystems: A case study of pastoral agriculture in New Zealand	Modélisation
L. de Sosa et al. 2018	Quantifying the contribution of riparian soils to the provision of ecosystem services	Réalisation de test expérimentaux sur des échantillons
Rutgers et al. 2012	A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms	
Schwilch et al. 2018	Assessing Impacts of Soil Management Measures on Ecosystem Services	Evaluation de l'évolution du capital naturel
Calzolari et al. 2016	A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale	
Choquet et al. 2021	Comparison of empirical and process-based modelling to quantify soil-supported ecosystem services on the Saclay plateau (France)	
Tzilivakis et al 2005	A prototype framework for assessing risks to soil functions	C'est un prototype mais l'approche a l'air intéressante
Read et al. 2016	Landscape function analysis to assess soil processes on farms following ecological restoration and changes in grazing management	
Safaei et al. 2019	Assessing the impacts of land use and land cover changes on soil functions using landscape function analysis and soil quality indicators in semi-arid natural ecosystems	
van Leeuwen et al. 2019	Modeling of Soil Functions for Assessing Soil Quality: Soil Biodiversity and Habitat Provisioning	Soil Navigator, fonction habitats
Janku et al 2022	Using soil quality indicators to assess their production and ecological functions	
Andrew et al. 2004	The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method	
Oberholzer et al. 2012	A novel method for soil quality in life cycle assessment using several soil indicators	
Burger and Kelting 1999	Using soil quality indicators to assess forest stand management	

Papiers sélectionnés pour la revue finale à partir des résultats de recherche sur Web Of Science		
Référence	Titre	Commentaire
Kirchmann and Andersson 2001	The swedish system for quality assessment of agricultural soils	
Erkossa et al. 2004	Participatory soil quality assessment: The case of smallholder farmers in Ethiopian highlands	
Bohanec et al. 2007	A qualitative multi-attribute model for assessing the impact of cropping systems on soil quality	
Horta et al. 2008	Assessing the Quality of the Soil by Stochastic Simulation	p385
Idowu et al 2008	Farmer-oriented assessment of soil quality using field, laboratory, and VNIR spectroscopy methods	Cornel Framework v1
Gelaw et al 2015	Soil Quality Indices for Evaluating Smallholder Agricultural Land Uses in Northern Ethiopia	Evaluation de 4 fonctions
Gonzaga et al. 2016	Atlantic forest soil as reference in the soil quality evaluation of coconut orchards (<i>Cocos nucifera</i> L) under different management	Utilisation d'une référence
Thoumazeau et al. 2019a and b	Biofunctool® : a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: concept and validation of the set of indicators Biofunctool® : a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part B: investigating the impact of land management of rubber plantations on soil quality with the Biofunctool® index	Outil Biofunctool
Tang et al. 2019	Developing characterization factors to quantify management impacts on soil quality of paddy fields within life cycle assessment	Méthode des fonctions scores avec une agrégation intermédiaire en fonctions pour de la LCA
O'Neil et al. 2021	Do soil health tests match farmer experience? Assessing biological, physical, and chemical indicators in the Upper Midwest United States	Comparaison d'une approche par indicateurs classique avec le ressenti des agriculteurs
Numes et al. 2021	The soil health assessment protocol and evaluation applied to soil organic carbon	Outil Shape, qui se base sur la teneur en MO, et scoring à l'aide de fonctions scores et de réseaux bayésiens
Ros et al. 2022	An Open Soil Health Assessment Framework Facilitating Sustainable Soil Management	Un outil un peu comme le soil navigator, avec uniquement l'objectif d'une production agricole soutenable
Toth et al. 2023	Soil quality assessment using SAS (Soil Assessment System)	Outil d'évaluation de la qualité des sols. Lien avec des "fonctions productives et non productives". Fonctions scores par classe

Tableau 8 : publications additionnelles incluses dans la revue bibliographique (en vert celles qui ont été revues).

Publications supplémentaires revues		
Référence	Titre	Commentaire
Rabot et al. 2022	Development and spatialization of a soil potential multifunctionality index for agriculture (Agri-SPMI) at the regional scale. Case study in the Occitanie region (France)	
Bock et al. 2010	The Land Suitability Rating System Is a Spatial Planning Tool to Assess Crop Suitability in Canada	Outil d'évaluation des terres canadien
Sanden et al. 2019	Development of an Agricultural Primary Productivity Decision Support Model: A Case Study In France	Soil Navigator, fonction productivité primaire
Danner et al. 2003	Das Schutzgut Boden in der Planung, Bewertung natürlicher Bodenfunktionen und Umsetzung in Planungs- und Genehmigungsverfahren.	
Lehmann et al. 2013	Technique for Soil Evaluation and Categorization for Natural and Anthropogenic Soils (TUSEC)	
Mueller et al. 2007	The Muencheberg Soil Quality Rating : field manual for detecting and assessing properties and limitations of soils for cropping and grazing	Outil de terrain d'évaluation de l'aptitude à des usages agricoles
Bechler and Toth 2010	Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit. Soil capacity rating	
Moebius-Clune et al. 2017	Comprehensive Assessment of Soil Health, The Cornell Framework	Cornell Framework

Références des publications

- Ali Imamoglu, & Dengiz, O. (2019). Evaluation of soil quality index to assess the influence of soil degradation and desertification process in sub-arid terrestrial ecosystem. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 30(4), Article 4. <https://doi.org/10.1007/s12210-019-00833-5>
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The Soil Management Assessment Framework. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), Article 6. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>
- Askari, M. S., & Holden, N. M. (2014). Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. *Geoderma*, 230-231, 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.019>
- Askari, M. S., & Holden, N. M. (2015). Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. *Soil and Tillage Research*, 150, 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.01.010>
- Bechler, K. & Toth, Oliver. (2010). Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit, Leitfaden für Planungen und Gestattungsverfahren (M. und N. B.-W. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Éd.). Verlagspublikation Umweltverwaltung Baden-Württemberg.
- Bell, M. C., & Raczkowski, C. W. (2008). Soil property indices for assessing short-term changes in soil quality. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 23(1), Article 1. <https://doi.org/10.1017/S1742170507001883>
- Bermeo, J. P. C., Hincapie, K. L. P., Cherubin, M. R., Morea, F. A. O., & Olaya, A. M. S. (2022). Evaluating soil quality in silvopastoral systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in the Colombian Amazon. *Revista Ciência Agrônômica*, 53, e20217966. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20220060>
- Bhaduri, D., & Purakayastha, T. J. (2014). Long-term tillage, water and nutrient management in rice–wheat cropping system : Assessment and response of soil quality. *Soil and Tillage Research*, 144, 83-95. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.07.007>
- Bilgili, A. V., Küçük, Ç., & Es, H. M. V. (2017). Assessment of the quality of the Harran Plain soils under long-term cultivation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(9), Article 9. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6177-y>
- Bock, M., Gasser, P.-Y., Pettapiece, W. W., Brierley, A. J., Bootsma, A., Schut, P., Neilsen, D., & Smith, C. A. S. (2018). The Land Suitability Rating System Is a Spatial Planning Tool to Assess Crop Suitability in Canada. *Frontiers in Environmental Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00077>
- Bohanec, M., Cortet, J., Griffiths, B., Žnidaršič, M., Debeljak, M., Caul, S., Thompson, J., & Krogh, P. H. (2007). A qualitative multi-attribute model for assessing the impact of cropping systems on soil quality. *Pedobiologia*, 51(3), Article 3. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2007.03.006>
- Burger, J. A., & Kelting, D. L. (1999). Using soil quality indicators to assess forest stand management. *Forest Ecology and Management*, 122(1), Article 1. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00039-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00039-0)
- Calzolari, C., Ungaro, F., Filippi, N., Guermandi, M., Malucelli, F., Marchi, N., Staffilani, F., & Tarocco, P. (2016). A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale. *Geoderma*, 261, 190-203. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.013>

- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Andrews, S. S., & Karlen, D. L. (2004). Watershed-scale assessment of soil quality in the loess hills of southwest Iowa. *Soil and Tillage Research*, 78(2), Article 2. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.02.015>
- Cao, Y., Li, X., Qian, X., Gu, H., Li, J., Chen, X., & Shen, G. (2023). Soil health assessment in the Yangtze River Delta of China : Method development and application in orchards. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 341, 108190. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108190>
- Chahal, I., & Eerd, L. L. V. (2019). Quantifying soil quality in a horticultural-cover cropping system. *Geoderma*, 352, 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.039>
- Cherubin, M. R., Tormena, C. A., & Karlen, D. L. (2017). Soil Quality Evaluation Using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian Oxisols with Contrasting Texture. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 41, e0160148. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160148>
- Choquet, P., Gabrielle, B., Chalhoub, M., Michelin, J., Sauzet, O., Scammacca, O., Garnier, P., Baveye, P. C., & Montagne, D. (2021). Comparison of empirical and process-based modelling to quantify soil-supported ecosystem services on the Saclay plateau (France). *Ecosystem Services*, 50, 101332. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101332>
- Dai, F., Lv, Z., & Liu, G. (2018). Assessing Soil Quality for Sustainable Cropland Management Based on Factor Analysis and Fuzzy Sets : A Case Study in the Lhasa River Valley, Tibetan Plateau. *Sustainability*, 10(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/su10103477>
- Danner, C., Hensold, C., Außendorf, M., Kraft, M., & Weidenbacher, A. (2003). Das Schutzgut Boden in der Planung, Bewertung natürlicher Bodenfunktionen und Umsetzung in Planungs- und Genehmigungsverfahren (B. L. für U. Bayerisches Geologisches Landesamt, Éd.). Ellwanger Bayreuth.
- Debeljak, M., Trajanov, A., Kuzmanovski, V., Schröder, J., Sandén, T., Spiegel, H., Wall, D. P., Van de Broek, M., Rutgers, M., Bampa, F., Creamer, R. E., & Henriksen, C. B. (2019). A Field-Scale Decision Support System for Assessment and Management of Soil Functions. *Frontiers in Environmental Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00115>
- Dengiz, O., Sekan \.IÇ, SAYGIN, F., Ali \.IMAMOĞLU, & MIHALIKOVA, M. (2020). Assessment of Soil Quality Index for Tea Cultivated Soils in Ortaçay Micro Catchment in Black Sea Region. *Tarım Bilimleri Dergisi*. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.468900>
- Dingkuhn, E. L., Wezel, A., Bianchi, F. J. J. A., Groot, J. C. J., Wagner, A., Yap, H. T., & Schulte, R. P. O. (2020). A multi-method approach for the integrative assessment of soil functions : Application on a coastal mountainous site of the Philippines. *Journal of Environmental Management*, 264, 110461. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110461>
- Dominati, E., Mackay, A., Green, S., & Patterson, M. (2014). A soil change-based methodology for the quantification and valuation of ecosystem services from agro-ecosystems : A case study of pastoral agriculture in New Zealand. *Ecological Economics*, 100, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.02.008>
- Ellili-Bargaoui, Y., Walter, C., Lemerrier, B., & Michot, D. (2021). Assessment of six soil ecosystem services by coupling simulation modelling and field measurement of soil properties. *Ecological Indicators*, 121, 107211. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107211>

- Erkossa, T., Stahr, K., & Gaiser, T. (2004). Participatory soil quality assessment: The case of smallholder farmers in Ethiopian highlands. *Soil Research*, 42(7), Article 7. <https://doi.org/10.1071/sr04021>
- Fernández, M. P., Keshavarzi, A., Rodrigo-Comino, J., Schnabel, S., Contador, J. F. L., Gutiérrez, Á. G., Parra, F. J. L., González, J. B., Torreño, A. A., & Cerdà, A. (2020). Developing scoring functions to assess soil quality at a regional scale in rangelands of SW Spain. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200090>
- Firdous, S., Begum, S., & Yasmin, A. (2016). Assessment of soil quality parameters using multivariate analysis in the Rawal Lake watershed. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(9), Article 9. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5527-5>
- Gao, R., Ai, N., Liu, G., Liu, C., & Zhang, Z. (2022). Soil C:N:P Stoichiometric Characteristics and Soil Quality Evaluation under Different Restoration Modes in the Loess Region of Northern Shaanxi Province. *Forests*, 13(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/f13060913>
- Gayán, A., Nath, and D. J., Bhattacharyya, B., Dutta, N., & and, and. (2020). Assessment of soil quality indicators under rice ecosystem of Assam, India. *Journal of Environmental Biology*, 41(6), Article 6. <https://doi.org/10.22438/jeb/41/6/si-246>
- Gelaw, A. M., Singh, B. R., & Lal, R. (2015). Soil Quality Indices for Evaluating Smallholder Agricultural Land Uses in Northern Ethiopia. *Sustainability*, 7(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/su7032322>
- Geng, S., Shi, P., Zong, N., & Zhu, W. (2018). Using Soil Survey Database to Assess Soil Quality in the Heterogeneous Taihang Mountains, North China. *Sustainability*, 10(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/su10103443>
- Gonzaga, M. I. S., Bispo, M. V. C., Silva, T. L. da, Santos, W. M. dos, & Santana, I. L. (2016). Solo de Mata Atlântica como referência na avaliação da qualidade do solo em pomares de coqueiro sob diferentes manejos. *Semina: Ciências Agrárias*, 37(6), Article 6. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n6p3847>
- Greiner, L., Nussbaum, M., Papritz, A., Fraefel, M., Zimmermann, S., Schwab, P., Grêt-Regamey, A., & Keller, A. (2018). Assessment of soil multi-functionality to support the sustainable use of soil resources on the Swiss Plateau. *Geoderma Regional*, 14, e00181. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00181>
- Gruber, F., Schaber, E., Baruck, J., & Geitner, C. (2019). How and to What Extent Does Topography Control the Results of Soil Function Assessment: A Case Study From the Alps in South Tyrol (Italy). *Soil Systems*, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3010018>
- Haslmayr, H.-P., Geitner, C., Sutor, G., Knoll, A., & Baumgarten, A. (2016). Soil function evaluation in Austria—Development, concepts and examples. *Geoderma*, 264, 379-387. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.023>
- Heepngoan, P., Thoumazeau, A., Renevier, M.-S., Sajjaphan, K., Gay, F., & Brauman, A. (2021). Relationships between physico-chemical, biological and functional approaches for soil quality assessment. A case study along a gradient of disturbance. *European Journal of Soil Biology*, 104, 103300. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2021.103300>
- Horta, A., Carvalho, J., & Soares, A. (2008). Assessing the Quality of the Soil by Stochastic Simulation (A. Soares, M. J. Pereira, & R. Dimitrakopoulos, Eds.; Vol. 15, p. 385-396). Springer.
- Idowu, O. J., Es, H. M. van, Abawi, G. S., Wolfe, D. W., Ball, J. I., Gugino, B. K., Moebius, B. N., Schindelbeck, R. R., & Bilgili, A. V. (2008). Farmer-oriented assessment of soil

quality using field, laboratory, and VNIR spectroscopy methods. *Plant and Soil*, 307(1-2), Article 1-2. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9521-0>

Janku, J., Kosanova, M., Kozak, J., Herza, T., Jehlicka, J., Maitah, M., Vopravil, J., Nemecek, K., Toth, D., Jacko, K., Vacha, R., & Polakova, J. (2022). Using soil quality indicators to assess their production and ecological functions. *Soil and Water Research*, 17(1), Article 1. <https://doi.org/10.17221/146/2021-SWR>

Jimenez, L. C. Z., Queiroz, H. M., Cherubin, M. R., & Ferreira, T. O. (2022). Applying the Soil Management Assessment Framework (SMAF) to Assess Mangrove Soil Quality. *Sustainability*, 14(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/su14053085>

Jost, E., Schönhart, M., Skalský, R., Balkovič, J., Schmid, E., & Mitter, H. (2021). Dynamic soil functions assessment employing land use and climate scenarios at regional scale. *Journal of Environmental Management*, 287, 112318. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112318>

Karaca, S., Dengiz, O., Turan, İ. D., Özkan, B., Dedeoğlu, M., Gülser, F., Sargin, B., Demirkaya, S., & Ay, A. (2021). An assessment of pasture soils quality based on multi-indicator weighting approaches in semi-arid ecosystem. *Ecological Indicators*, 121, 107001. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107001>

Karlen, D. L., Tomer, M. D., Neppel, J., & Cambardella, C. A. (2008). A preliminary watershed scale soil quality assessment in north central Iowa, USA. *Soil and Tillage Research*, 99(2), Article 2. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.03.002>

Kirchmann, H., & Andersson, R. (2001). The Swedish System for Quality Assessment of Agricultural Soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 72(2), Article 2. <https://doi.org/10.1023/a:1012048124858>

Koschel, S., & Lennartz, B. (2021). GIS-basierte Bewertung natürlicher Bodenfunktionen am Beispiel der Regiopolegion Rostock. *WASSERWIRTSCHAFT*, 111(1), Article 1. <https://doi.org/10.1007/s35147-020-0778-z>

Lehmann, A., David, S., & Stahr, K. (2013). TUSEC - Bilingual-Edition : Eine Methode zur Bewertung natürlicher und anthropogener Böden (Deutsche Fassung). Kommunikations-, Informations- und Medienzentrums der Universität Hohenheim.

Lima, A. C. R., Brussaard, L., Totola, M. R., Hoogmoed, W. B., & Goede, R. G. M. de. (2013). A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality. *Applied Soil Ecology*, 64, 194-200. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.12.009>

Luz, F. B. da, Silva, V. R. da, Mallmann, F. J. K., Pires, C. A. B., Debiassi, H., Franchini, J. C., & Cherubin, M. R. (2019). Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 281, 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.05.006>

Masto, R. E., Chhonkar, P. K., Purakayastha, T. J., Patra, A. K., & Singh, D. (2008). Soil quality indices for evaluation of long-term land use and soil management practices in semi-arid sub-tropical India. *Land Degradation & Development*, 19(5), Article 5. <https://doi.org/10.1002/ldr.857>

Masto, R. E., Chhonkar, P. K., Singh, D., & Patra, A. K. (2007). Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136(1-3), Article 1-3. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9697-z>

Mazzon, M., Cavani, L., Ciavatta, C., Campanelli, G., Burgio, G., & Marzadori, C. (2021). Conventional versus organic management : Application of simple and complex indexes to assess soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 322, 107673. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107673>

- Mishra, G., Marzaioli, R., Giri, K., Borah, R., Dutta, A., & Jayaraj, R. S. C. (2017). Soil quality assessment under shifting cultivation and forests in Northeastern Himalaya of India. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(10), Article 10. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1281390>
- Moebius-Clune, B. N., Moebius-Clune, D. J., Gugino, B. K., Idowu, O. J., Schindelbeck, R. R., Ristow, A. J., Es, H. M. van, Thies, J. E., Shayler, H. A., McBride, M. B., Kurtz, K. S. M., Wolfe, D. W., & Abawi, G. S. (2016). *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework (3.2)*. Cornell University.
- Mueller, L., Schindler, U., Behrendt, A., Eulenstein, F., Dannowski, R., Schlindwein, S. L., Shepherd, T. G., Smolentseva, E., & Rogasik, J. (2007). The Muencheberg Soil Quality Rating (SQR). *Field Manual for Detecting and Assessing Properties and Limitations of Soils for Cropping and Grazing*.
- Muñoz-Rojas, M., Erickson, T. E., Dixon, K. W., & Merritt, D. J. (2016). Soil quality indicators to assess functionality of restored soils in degraded semiarid ecosystems. *Restoration Ecology*, 24(S2), Article S2. <https://doi.org/10.1111/rec.12368>
- Nabiollahi, K., Taghizadeh-Mehrjardi, R., & Eskandari, S. (2018). Assessing and monitoring the soil quality of forested and agricultural areas using soil-quality indices and digital soil-mapping in a semi-arid environment. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(5), Article 5. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1373188>
- Negiş, H., Şeker, C., Gümüş, İ., & Erci, V. (2023). Establishment of a minimum dataset and soil quality assessment for multiple reclaimed areas on a wind-eroded region. *CATENA*, 229, 107208. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107208>
- Nunes, M. R., Veum, K. S., Parker, P. A., Holan, S. H., Karlen, D. L., Amsili, J. P., van Es, H. M., Wills, S. A., Seybold, C. A., & Moorman, T. B. (2021). The soil health assessment protocol and evaluation applied to soil organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 85(4), Article 4. <https://doi.org/10.1002/saj2.20244>
- Oberholzer, H.-R., Knuchel, R. F., Weisskopf, P., & Gaillard, G. (2012). A novel method for soil quality in life cycle assessment using several soil indicators. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(3), Article 3. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0072-7>
- Obriot, F., Stauffer, M., Goubard, Y., Cheviron, N., Peres, G., Eden, M., Revallier, A., Vieublé-Gonod, L., & Houot, S. (2016). Multi-criteria indices to evaluate the effects of repeated organic amendment applications on soil and crop quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 232, 165-178. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.004>
- O'Neill, B., Sprunger, C. D., & Robertson, G. P. (2021). Do soil health tests match farmer experience? Assessing biological, physical, and chemical indicators in the Upper Midwest United States. *Soil Science Society of America Journal*, 85(3), Article 3. <https://doi.org/10.1002/saj2.20233>
- Ozgoz, E., Gunal, H., Acir, N., Gokmen, F., Birol, M., & Budak, M. (2013). Soil quality and spatial variability assessment of land use effects in a typic haplustoll. *Land Degradation & Development*, 24(3), Article 3. <https://doi.org/10.1002/ldr.1126>
- Paz-Kagan, T., Shachak, M., Zaady, E., & Karnieli, A. (2014). Evaluation of ecosystem responses to land-use change using soil quality and primary productivity in a semi-arid area, Israel. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 193, 9-24. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.04.024>
- Pheap, S., Lefèvre, C., Thoumazeau, A., Leng, V., Boulakia, S., Koy, R., Hok, L., Lienhard, P., Brauman, A., & Tivet, F. (2019). Multi-functional assessment of soil health under Conservation Agriculture in Cambodia. *Soil and Tillage Research*, 194, 104349. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104349>

- Rabot, E., Guiresse, M., Pittatore, Y., Angelini, M., Keller, C., & Lagacherie, P. (2022). Development and spatialization of a soil potential multifunctionality index for agriculture (Agri-SPMI) at the regional scale. Case study in the Occitanie region (France). *Soil Security*, 6, 100034. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100034>
- Raiesi, F. (2017). A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. *Ecological Indicators*, 75, 307-320. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.049>
- Raiesi, F., & Beheshti, A. (2022). Evaluating forest soil quality after deforestation and loss of ecosystem services using network analysis and factor analysis techniques. *CATENA*, 208, 105778. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105778>
- Raiesi, F., & Pejman, M. (2021). Assessment of post-wildfire soil quality and its recovery in semi-arid upland rangelands in Central Iran through selecting the minimum data set and quantitative soil quality index. *CATENA*, 201, 105202. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105202>
- Read, Z. J., King, H. P., Tongway, D. J., Ogilvy, S., Greene, R. S. B., & Hand, G. (2016). Landscape function analysis to assess soil processes on farms following ecological restoration and changes in grazing management. *European Journal of Soil Science*, 67(4), Article 4. <https://doi.org/10.1111/ejss.12352>
- Rekik, F., Es, H. van, Hernandez-Aguilera, J. N., & Gómez, M. I. (2018). Soil health assessment for coffee farms on andosols in Colombia. *Geoderma Regional*, 14, e00176. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00176>
- Ros, G. H., Verweij, S. E., Janssen, S. J. C., De Haan, J., & Fujita, Y. (2022). An Open Soil Health Assessment Framework Facilitating Sustainable Soil Management. *Environmental Science & Technology*, 56(23), Article 23. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c04516>
- Rutgers, M., Wijnen, H. J. van, Schouten, A. J., Mulder, C., Kuiten, A. M. P., Brussaard, L., & Breure, A. M. (2012). A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms. *Science of The Total Environment*, 415, 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.041>
- Sadiq, F. K., Maniyunda, L. M., Adegoke, K. A., & Anumah, A. O. (2021). Evaluating quality of soils formed on basement complex rocks in Kaduna State, northern Guinea savanna of Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(7), Article 7. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09157-0>
- Safaei, M., Bashari, H., Mosaddeghi, M. R., & Jafari, R. (2019). Assessing the impacts of land use and land cover changes on soil functions using landscape function analysis and soil quality indicators in semi-arid natural ecosystems. *CATENA*, 177, 260-271. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.02.021>
- Saleh, A. M., Elsharkawy, M. M., AbdelRahman, M. A. E., & Arafat, S. M. (2021). Evaluation of Soil Quality in Arid Western Fringes of the Nile Delta for Sustainable Agriculture. *Applied and Environmental Soil Science*, 2021, 1-17. <https://doi.org/10.1155/2021/1434692>
- Sandén, T., Trajanov, A., Spiegel, H., Kuzmanovski, V., Saby, N. P. A., Picaud, C., Henriksen, C. B., & Debeljak, M. (2019). Development of an Agricultural Primary Productivity Decision Support Model: A Case Study in France. *Frontiers in Environmental Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00058>
- Santos, W. P. dos, Silva, M. L. N., Avanzi, J. C., Acuña-Guzman, S. F., Cândido, B. M., Cirillo, M. Â., & Curi, N. (2021). Soil quality assessment using erosion-sensitive indices

and fuzzy membership under different cropping systems on a Ferralsol in Brazil. *Geoderma Regional*, 25, e00385. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00385>

Santos-Francés, F., Martínez-Graña, A., Ávila-Zarza, C., Criado, M., & Sánchez-Sánchez, Y. (2022). Soil Quality and Evaluation of Spatial Variability in a Semi-Arid Ecosystem in a Region of the Southeastern Iberian Peninsula (Spain). *Land*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/land11010005>

Schaber, E., D'Amico, M. E., Pintaldi, E., Stanchi, S., Freppaz, M., & Geitner, C. (2022). Soil function assessment in high-mountain environments: Testing the *lesscp* greaterSEPP *less/scp* greater tool in a ski resort in the Italian Alps. *Soil Use and Management*, 39(1), Article 1. <https://doi.org/10.1111/sum.12840>

Schindelbeck, R. R., Es, H. M. van, Abawi, G. S., Wolfe, D. W., Whitlow, T. L., Gugino, B. K., Idowu, O. J., & Moebius-Clune, B. N. (2008). Comprehensive assessment of soil quality for landscape and urban management. *Landscape and Urban Planning*, 88(2), Article 2. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.08.006>

Schwilch, G., Lemann, T., Berglund, Ö., Camarotto, C., Cerdà, A., Daliakopoulos, I. N., Kohnová, S., Krzeminska, D., Marañón, T., Rietra, R., Siebielec, G., Thorsson, J., Tibbett, M., Valente, S., Van Delden, H., Van den Akker, J., Verzandvoort, S., Vrinceanu, N. O., Zoumides, C., & Hessel, R. (2018). Assessing Impacts of Soil Management Measures on Ecosystem Services. *Sustainability*, 10(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/su10124416>

Şeker, C., Özyaytekin, H. H., Negiş, H., Gümüş, İ., İlknur, Dedeoğlu, M., Atmaca, E., & Karaca, Ü. (2017). Assessment of soil quality index for wheat and sugar beet cropping systems on an entisol in Central Anatolia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(4), Article 4. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5848-z>

Shao, G., Ai, J., Sun, Q., Hou, L., & Dong, Y. (2020). Soil quality assessment under different forest types in the Mount Tai, central Eastern China. *Ecological Indicators*, 115, 106439. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106439>

Sharma, K. L., Grace, J. K., Mandal, U. K., Gajbhiye, P. N., Srinivas, K., Korwar, G. R., Bindu, V. H., Ramesh, V., Ramachandran, K., & Yadav, S. K. (2008). Evaluation of long-term soil management practices using key indicators and soil quality indices in a semi-arid tropical Alfisol. *Soil Research*, 46(4), Article 4. <https://doi.org/10.1071/sr07184>

Simoës-Mota, A., Poch, R. M., Enrique, A., Orcaray, L., & Virto, I. (2021). Soil Quality Assessment after 25 Years of Sewage Sludge vs. Mineral Fertilization in a Calcareous Soil. *Land*, 10(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/land10070727>

Sosa, L. L. de, Glanville, H. C., Marshall, M. R., Williams, A. P., & Jones, D. L. (2018). Quantifying the contribution of riparian soils to the provision of ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 624, 807-819. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.179>

Swanepoel, P. A., Preez, C. C. du, Botha, P. R., Snyman, H. A., & Habig, J. (2015). Assessment of tillage effects on soil quality of pastures in South Africa with indexing methods. *Soil Research*, 53(3), Article 3. <https://doi.org/10.1071/sr14234>

Taghipour, K., Heydari, M., Kooch, Y., Fathizad, H., Heung, B., & Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2022). Assessing changes in soil quality between protected and degraded forests using digital soil mapping for semiarid oak forests, Iran. *CATENA*, 213, 106204. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106204>

Tang, L., Hayashi, K., Ohigashi, K., Shimura, M., & Kohyama, K. (2019). Developing characterization factors to quantify management impacts on soil quality of paddy fields within life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117890. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117890>

- Thoumazeau, A., Bessou, C., Renevier, M.-S., Panklang, P., Puttaso, P., Peerawat, M., Heepngoen, P., Polwong, P., Koonklang, N., Sdoodee, S., Chantuma, P., Lawongsa, P., Nimkingrat, P., Thaler, P., Gay, F., & Brauman, A. (2019). Biofunctool® : A new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part B: investigating the impact of land management of rubber plantations on soil quality with the Biofunctool® index. *Ecological Indicators*, 97, 429-437. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.028>
- Thoumazeau, A., Bessou, C., Renevier, M.-S., Trap, J., Marichal, R., Mareschal, L., Decaëns, T., Bottinelli, N., Jaillard, B., Chevallier, T., Suvannang, N., Sajjaphan, K., Thaler, P., Gay, F., & Brauman, A. (2019). Biofunctool® : A new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: concept and validation of the set of indicators. *Ecological Indicators*, 97, 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.023>
- Toth, D., Janku, J., Marhoul, M. A., Kozak, J., Maitah, M., Jehlicka, J., Rehacek, L., Prikryl, R., Herza, T., Vopravil, J., Kincl, D., & Khel, T. (2023). Soil quality assessment using SAS (Soil Assessment System). *Soil and Water Research*, 18(1), Article 1. <https://doi.org/10.17221/141/2022-SWR>
- Triantafyllidis, V., Kosma, A. K. C., & Patakas, A. (2019). An Assessment of the Soil Quality Index in a Mediterranean Agro Ecosystem. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 30(12), Article 12. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2018.v30.i12.1886>
- Tzivilakis, J., Lewis, K. A., & Williamson, A. R. (2005). A prototype framework for assessing risks to soil functions. *Environmental Impact Assessment Review*, 25(2), Article 2. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2004.02.003>
- Valujeva, K., Nipers, A., Lupikis, A., & Schulte, R. P. O. (2020). Assessment of Soil Functions : An Example of Meeting Competing National and International Obligations by Harnessing Regional Differences. *Frontiers in Environmental Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.591695>
- van Leeuwen, J. P., Creamer, R. E., Cluzeau, D., Debeljak, M., Gatti, F., Henriksen, C. B., Kuzmanovski, V., Menta, C., Pérès, G., Picaud, C., Saby, N. P. A., Trajanov, A., Trinsoutrot-Gattin, I., Visioli, G., & Rutgers, M. (2019). Modeling of Soil Functions for Assessing Soil Quality: Soil Biodiversity and Habitat Provisioning. *Frontiers in Environmental Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00113>
- Vazquez, C., de Goede, R. G. M., Rutgers, M., de Koeijer, T. J., & Creamer, R. E. (2021). Assessing multifunctionality of agricultural soils : Reducing the biodiversity trade-off. *European Journal of Soil Science*, 72(4), Article 4. <https://doi.org/10.1111/ejss.13019>
- Velasquez, E., & Lavelle, P. (2019). Soil macrofauna as an indicator for evaluating soil based ecosystem services in agricultural landscapes. *Acta Oecologica*, 100, 103446. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2019.103446>
- Virtol., J. I., Fernández-Ugalde O., Urrutial., Enrique A., & Bescansa P. (2012). Soil quality evaluation following the implementation of permanent cover crops in semi-arid vineyards. Organic matter, physical and biological soil properties. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10(4), Article 4. <https://doi.org/10.5424/sjar/2012104-613-11>
- Volchko, Y., Norrman, J., Rosén, L., Bergknut, M., Josefsson, S., Söderqvist, T., Norberg, T., Wiberg, K., & Tysklind, M. (2014). Using soil function evaluation in multi-criteria decision analysis for sustainability appraisal of remediation alternatives. *Science of The Total Environment*, 485-486, 785-791. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.087>
- Volchko, Y., Norrman, J., Rosèn, L., & Norberg, T. (2014). A minimum data set for evaluating the ecological soil functions in remediation projects. *Journal of Soils and Sediments*, 14(11), Article 11. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0939-8>

- Vrebos, D., Jones, A., Lugato, E., O'Sullivan, L., Schulte, R., Staes, J., & Meire, P. (2021). Spatial evaluation and trade-off analysis of soil functions through Bayesian networks. *European Journal of Soil Science*, 72(4), Article 4. <https://doi.org/10.1111/ejss.13039>
- Wei, L., Li, Y., Zhu, Z., Wang, F., Liu, X., Zhang, W., Xiao, M., Li, G., Ding, J., Chen, J., Kuzyakov, Y., & Ge, T. (2022). Soil health evaluation approaches along a reclamation consequence in Hangzhou Bay, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 337, 108045. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108045>
- Wu, Q., Zheng, W., Rao, C., Wang, E., & Yan, W. (2022). Soil Quality Assessment and Management in Karst Rocky Desertification Ecosystem of Southwest China. *Forests*, 13(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/f13091513>
- Xue, R., Wang, C., Liu, M., Zhang, D., Li, K., & Li, N. (2019). A new method for soil health assessment based on Analytic Hierarchy Process and meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 650, 2771-2777. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.049>
- Ye, R., Parajuli, B., Szogi, A. A., Sigua, G. C., & Ducey, T. F. (2021). Soil health assessment after 40 years of conservation and conventional tillage management in Southeastern Coastal Plain soils. *Soil Science Society of America Journal*, 85(4), Article 4. <https://doi.org/10.1002/saj2.20246>
- Yu, P., Liu, S., Zhang, L., Li, Q., & Zhou, D. (2018). Selecting the minimum data set and quantitative soil quality indexing of alkaline soils under different land uses in northeastern China. *Science of The Total Environment*, 616-617, 564-571. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.301>
- Zhang, X., Li, Y., Wang, G., Zhang, H., Yu, R., Li, N., Zheng, J., & Yu, Y. (2022). Soil Quality Assessment in Farmland of a Rapidly Industrializing Area in the Yangtze Delta, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912912>
- Zhao, R., & Wu, K. (2021). Soil Health Evaluation of Farmland Based on Functional Soil Management—A Case Study of Yixing City, Jiangsu Province, China. *Agriculture*, 11(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070583>
- Zornoza, R., Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Arcenegui, V., García-Orenes, F., Mataix-Beneyto, J., & Morugán, A. (2007). Evaluation of soil quality using multiple lineal regression based on physical, chemical and biochemical properties. *Science of The Total Environment*, 378(1), Article 1. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.01.052>
- Zwetsloot, M. J., Bongiorno, G., Barel, J. M., Lonardo, D. P. di, & Creamer, R. E. (2022). A flexible selection tool for the inclusion of soil biology methods in the assessment of soil multifunctionality. *Soil Biology and Biochemistry*, 166, 108514. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108514>

Annexe 3 : schéma de fonctionnement de WaLIS

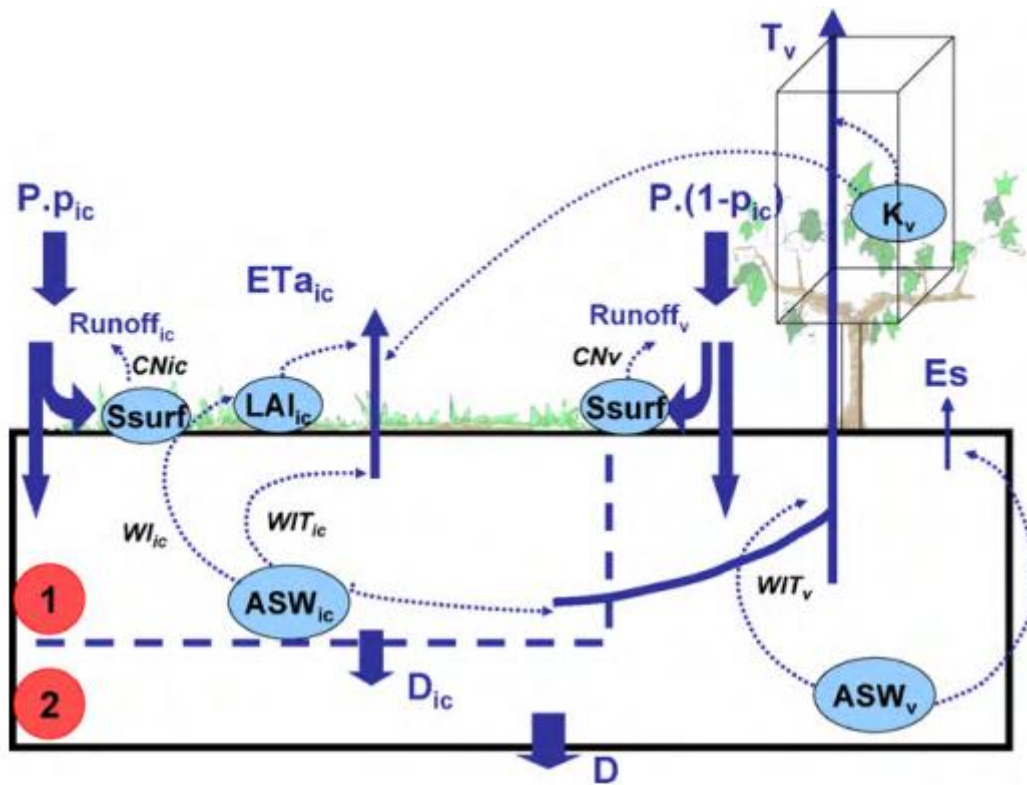


Fig. 1. Conceptual representation of the intercropped system water balance. ASW_{ic} and ASW_v are the available soil water of the intercrop and grapevine compartments, respectively. Each soil compartment has been numbered in a red circle. Compartment '1' is the intercrop's one and '2' the grapevine's one. D_{ic} is the drainage flow from the intercrop compartment to the one below and D is the water loss by drainage to deep soil layers inaccessible to grapevine. LAI_{ic} is the leaf area index of the intercrop. Es is the soil evaporation from the bare soil of the row. S_{surf} represents the soil surface state and could differ between row and inter-row. This soil surface state determines the CN parameter of inter-row (CN_{ic}) and row (CN_v) that affects surface runoff ($Runoff_{ic}$ and $Runoff_v$, respectively). ETa_{ic} is the actual evapotranspiration of the intercrop cover (both cover transpiration and soil evaporation). T_v is the grapevine transpiration which is driven by the grapevine light interception coefficient (k_v). Finally, P is the precipitation and p_{ic} is the soil proportion covered by the intercrop.

Figure 13 : les deux compartiments du sol dans le modèle WaLIS, (tiré de Celette et al., 2010).

Annexe 4 : paramètres d'entrée des simulations sur WaLIS

Dans cette annexe, on regroupe tous les paramètres qui nous ont servi pour réaliser les simulations, en plus des paramètres nécessitant d'être initialisés, présentés dans le corps du rapport dans le Tableau 4.

Tableau 9 : paramètres du modèle communs aux deux parcelles

Paramètres du modèle			
Paramètre	Description	Valeur	Unité
seuilpeff	seuil de pluie pour considérer un ruissellement possible	2	mm
inn	Indice de nutrition azoté	0,3	
LAIh_rate	Taux de croissance du LAI de l'enherbement	0,65	
LLSmin	Nombre de degré-jour avant la sénescence de l'enherbement	540	°Cd
arretTr	Date d'arrêt de transpiration de la vigne	01-nov	
ddkmax	Nombre de degré-jour pour atteindre le kmax de la vigne	600	°Cd
CNR	Curve number sous le rang	86	
CNIR	Curve Number sous l'interrang	83	
P5J1_R/P5J2_R	Seuils de pluie sous le rang	12,7/28	mm
P5J1_IR/P5J2_IR	Seuils de pluie sous l'interrang	35,6/53	mm
U	Réservoir utile de surface	2,7	mm
b1/b2	Paramètres d'évaporation du sol	14/0,15	
FTSWhregultr	FTSW à partir duquel l'herbe régule sa transpiration	0,5	mm
FTSWhregulLAI	FTSW à partir duquel l'herbe régule son LAI	0,7	mm
FTSWvregulTR	FTSW à partir duquel la vigne régule sa transpiration	0,4	mm

Tableau 10 : paramètres du modèles spécifiques à chaque parcelle

Paramètres propres à chaque parcelle				
Paramètre	Description	Valeur pour P1	Valeur pour P7	Unité
pmax	proportion maximale de sol enherbé	1	1	
pmin	proportion minimale de sol enherbé	0	0	
TTSWtot	Reservoir total	300	180	mm
TTSWhmax	Reservoir maximal accessible à l'herbe	60	60	mm
dlabourIR	Dates de travail de l'inter-rang	15/02/19	21/05/19 20/03/20 06/05/20	
		30/03/19		
		30/04/19		
		30/05/19		
		30/06/19		
		15/08/19		
		10/10/19		
		15/02/20		
		31/03/20		
		28/04/20		
dlabourR	Dates de travail du rang	15/03/19	22/03/19	
		10/06/19	21/05/19	
		15/03/20	20/06/19	
			17/03/20	
dbr	Dates de débourrement de la vigne	07/04/19	07/04/19	
		30/03/20	30/03/20	
kmax	Coefficient de culture maximal	0,62	0,56	

Annexe 5 : positionnement du cadre conceptuel dans la littérature

Matériels et Méthode

Il existe une diversité de concepts dans la littérature, qui se rapprochent plus ou moins de ceux proposés dans le cadre conceptuel. Ces concepts existants ont été à la base de notre réflexion, notre cadre conceptuel ne vise pas à remplacer ces derniers. Au contraire, arriver à placer nos concepts parmi ceux déjà existant permet de les rendre plus facilement compréhensibles et acceptables pour des personnes qui utilisent un ensemble de définitions et de notions différent. Replacer nos concepts dans la littérature existante permettrait également à quelqu'un qui voudrait consulter la littérature d'identifier facilement les ressemblances et différences entre concepts.

En tout, 5 grandes notions ont été retenues, qui nous semblent être les principales : la qualité des sols, la santé des sols, la sécurité des sols, le capital naturel du sol, et enfin l'état actuel et le potentiel de Vogel et al. (2019).

Qualité et santé sont les termes les plus souvent utilisés en lien avec l'évaluation des sols (la recherche « soil quality (TITLE) » sur Web Of Science donne plus de 3000 résultats, « soil health » plus de 1000). Tout le monde ne s'accorde pas tout à fait sur leurs définitions. Par exemple, à l'issue d'une revue sur la qualité des sols, Bünemann et al. (2018) concluent que les termes peuvent être utilisés de manière synonyme. A l'opposé, Lehmann et al. (2020) considèrent que les deux termes sont différents et préfèrent employer le terme santé. Raccrocher ces termes au cadre conceptuel nécessite donc d'en donner les différentes définitions. Cela a été réalisé sur la base de 7 papiers publiés entre 1994 et 2003 et qui nous semblent couvrir les différents aspects de la question.

La sécurité des sols est une notion plus récente, avec un papier fondateur en 2013 (Koch et al., 2013). Elle dépasse une simple évaluation de fonctions du sol et considère également des dimensions socio-économiques. Notre cadre conceptuel recoupe une partie du cadre de la sécurité des sols, notamment les notions de capacité et de condition.

Le capital naturel des sols est un cadre conceptuel qui permet de rattacher les fonctions du sol aux services écosystémiques, pour qu'ils soient davantage pris en compte dans les outils d'évaluation de services écosystémiques, et permettre aux chercheurs en sciences du sol d'aller au-delà des fonctions du sol et d'adhérer à la notion de services écosystémiques. Robinson et al. (2009) et Dominati et al. (2010) ont publié indépendamment un cadre conceptuel sur le capital naturel des sols, qui se ressemblent sur certains points et diffèrent sur d'autres. Les concepts avancés dans ces cadres trouvent des équivalents dans le nôtre.

Enfin, Vogel et al. (2019) ont proposé une approche innovante en exploitant la différence réalisée depuis longtemps entre propriétés inhérentes et dynamiques des sols, mais jamais appliquée à l'évaluation simultanée de deux quantités : l'état et le potentiel des fonctions du sol. Cette distinction état/potentiel a été structurante dans notre cadre conceptuel, et il convient donc de faire les liens avec ce papier.

Qualité, santé et multifonctionnalité des sols

Le terme de qualité des sols est historiquement lié à la productivité agricole (Bünemann et al., 2018; Creamer et al., 2022). Dans les années 1990, la signification de ce terme a été repensée pour inclure toutes les fonctions réalisées par les sols. Doran & Parkin

(1994), puis Karlen et al. (1997) ont posé la définition de base et communément admise de la qualité des sols comme : « la capacité d'un type spécifique des sols à fonctionner, dans les limites de l'écosystème naturel ou géré par l'être humain, pour soutenir la productivité végétale et animale, maintenir ou améliorer la qualité de l'air et de l'eau, et supporter la santé et l'habitat des humains ». D'autres formulations proches, avec d'autres nuances, ont également été formulées (Pankhurst et al., 1997).

En parallèle de la réflexion autour du terme de qualité a émergé le terme de santé des sols (Bünemann et al., 2018). Cela a lancé un débat sur la définition et la portée exacte de ces deux termes, certains les utilisant de manière interchangeable (Harris et al., 1996; Karlen et al., 2003; Andrews et al., 2004; Bünemann et al., 2018; Rinot et al., 2019), ou non (Pankhurst et al., 1997; Lehmann et al., 2020), et d'autres considérant la santé comme une composante dynamique de la qualité des sols (Karlen et al., 1997; Moebius-Clune et al., 2016). Le Tableau 11 regroupe un ensemble de publications qui ont largement traité de la question de la différence entre qualité et santé et qui donne un aperçu des arguments pour l'un ou l'autre terme. La liste n'est pas exhaustive, mais on considère qu'elle est suffisante pour illustrer les différentes opinions sur la question, qui subsistent jusqu'à aujourd'hui. On peut en conclure que le choix d'un terme ou de l'autre dépend largement de la préférence des auteurs, ces termes ont donc le désavantage de devoir être définis précisément à chaque utilisation. De plus, les définitions, typiquement celle donnée plus haut, sont très précises et assez peu opérationnelles : que mesurer, quel critère fait un sol de qualité ou en bonne santé ? Cela ne va pas de soi avec les définitions données.

Tableau 11 : comparaison des différentes conceptions des termes « qualité » et « santé » qui structurent la pensée actuelle autour de ces termes.

Reference	Terme utilisé dans le titre de la publication	Point de vue des auteurs
Doran & Parkin (1994)	Qualité	Qualité et santé sont utilisés de manière synonyme (sans justification)
Harris et al. (1996)	Qualité et santé	Les deux termes sont synonymes, à condition de ne conserver que les fonctions du sol qui dépendent en partie de processus biologiques (on retire la fonction source de matériaux).
Karlen et al. (1997)	Qualité	Les termes sont considérés comme similaires. Cependant, il se trouve que les agriculteurs préfèrent le terme santé et les scientifiques le terme qualité. Pour eux, la qualité est double : une caractéristique inhérente (contrôlée par la pédogenèse) et la condition ou santé, relative à la qualité intrinsèque.
Seybold et al. (1997)	Qualité	La qualité est double : une qualité inhérente et une qualité dynamique. La qualité inhérente est déterminée par la pédogenèse (les « soil forming factors »), et peut être utilisée pour comparer les aptitudes des sols et leur adéquation à différents usages. La qualité dynamique renvoie à la nature dynamique du sol et à un état actuel de la qualité : « sa condition ou santé sera considérée de moins bonne qualité ». La santé désigne donc l'état actuel de la qualité dynamique.

Pankhurst et al. (1997)	Santé	Dans la synthèse du rapport (p 419 et suivantes), les auteurs reviennent sur la différence entre la santé et la qualité. Pour eux, « le terme qualité est approprié lorsque l'usage du sol est spécifié », ainsi, un sol peut être de bonne qualité pour un usage, et de qualité médiocre pour un autre. Ce sont essentiellement les propriétés intrinsèques qui constituent la qualité du sol. La santé, au contraire, va au-delà de l'aptitude pour un usage, et considère l'écologie du sol (qui n'est pas inhérente). Il y a également une notion de durée dans la santé : un sol en bonne santé réalise durablement des fonctions. Ils résument par : « la qualité se concentre sur la capacité du sol à remplir des besoins humains bien définis, comme la croissance d'une culture en particulier, alors que la santé des sols se concentre plus sur la capacité continue à soutenir la croissance des plantes et maintenir ses fonctions ».
Doran & Zeiss (2000)	Qualité et santé	La santé est une composante de la qualité des sols, mais les auteurs considèrent que les termes peuvent être employés de manière synonyme. Ils préfèrent le terme santé car il véhicule l'idée que le sol est un objet dynamique, et dont le fonctionnement est largement conditionné par les organismes vivants qu'il abrite. Le terme qualité serait plus lié à un usage, là où santé est plus général. Les auteurs reconnaissent également qu'il existe deux composantes à la qualité : une composante inhérente et une composante dynamique, mais ne font pas le lien avec la santé.
Karlen et al. (2003)	Qualité	Qualité et santé sont synonymes. Il y a deux types de qualité : les propriétés inhérentes déterminent les « capacités absolues » du sol, que l'on évalue sur toute la profondeur du sol, là où la « qualité dynamique des sols » décrit « le statut ou la condition du sol dû à un usage et des pratiques récentes », et ne concerne que les 30 premiers centimètres.

D'après cette revue de littérature, la qualité peut donc être traduite dans notre cadre conceptuel en termes de :

- Une compatibilité (à partir de la capacité, du potentiel, ou du niveau de remplissage des fonctions d'intérêts), pour une qualité définie comme relative à un usage (Pankhurst et al., 1997; Seybold et al., 1997).
- Une capacité ou un potentiel pour une qualité définie comme une « capacité à fonctionner... » (Doran & Parkin, 1994; Harris et al., 1996). La qualité « inhérente » correspond à un potentiel, et la qualité « dynamique » à une capacité (Karlen et al., 1997; Seybold et al., 1997; Doran & Zeiss, 2000; Karlen et al., 2003).

Pour la santé, on peut avoir :

- Une capacité, pour la santé définie comme une « capacité continue des sols à fonctionner » (Doran & Parkin, 1994; Harris et al., 1996; Pankhurst et al., 1997; Doran & Zeiss, 2000; Karlen et al., 2003).
- Une capacité également pour la santé vue comme une composante dynamique de la qualité des sols, elle-même définie comme une « capacité à fonctionner ... » (Karlen et al., 1997; Seybold et al., 1997).

En Europe, le terme de santé des sols s'impose dans la réglementation : il était absent de la proposition d'une directive européenne sur la protection des sols en 2006 (European Commission, 2006), mais constitue désormais la notion centrale de la proposition de directive de 2023 (Directorate-General for Environment, 2023), ainsi que d'un rapport de l'Agence Européenne pour l'Environnement (EEA) sur la gestion des sols (European Environment Agency, 2023). Dans la proposition de loi, elle est définie comme : « la condition physique, chimique et biologique du sol qui détermine sa capacité à fonctionner comme un système vivant vital et à fournir des services écosystémiques ». Cette définition renvoie donc à la capacité dans notre cadre conceptuel. C'est aussi ce que l'on retrouve dans le document de l'EEA. Dans l'annexe I de la proposition de directive, on voit que les indicateurs de la santé des sols proposés portent sur les processus de dégradation, et pas sur des fonctions du sol. Essentiellement, des mesures de propriétés des sols (à l'exception de l'érosion, qui doit sûrement être estimée par modélisation) renseignent sur l'état des processus de dégradation. Dans notre cadre conceptuel, une évaluation de l'état de dégradation du sol est une mesure de la distance entre la capacité actuelle et le potentiel du sol.

Un concept connexe à la qualité et la santé des sols est la multifonctionnalité des sols, qui désigne la réalisation simultanée de multiples fonctions du sol (Creamer et al., 2022). Ce terme est de plus en plus utilisé à la place des deux précédents. On peut s'en rendre compte avec une simple recherche « soil multifunctionality (TITRE) » sur le Web Of Science. Sur 149 papiers qui ont le terme dans leur titre, 108 ont été publiés en 2021 et après. Avant 2017, seuls 7 papiers utilisent le terme « multifonctionnalité » dans leur titre, le plus ancien datant de 2000 (tous ces papiers ne portent pas forcément sur la multifonctionnalité des sols, mais aussi sur la multifonctionnalité des écosystèmes. Dans tous les cas, ces 149 papiers font un lien entre le sol et une multifonctionnalité). Peu importe la gestion du sol et l'objectif que poursuit un utilisateur, les sols fournissent de nombreuses fonctions, dont le niveau varie avec la gestion du sol et les aléas environnementaux. Ce terme a l'avantage d'être consensuel et d'avoir une définition facilement applicable : évaluer la multifonctionnalité, c'est évaluer le niveau de remplissage, la capacité, ou le potentiel de plusieurs fonctions à la fois.

Etat et potentiel de Vogel et al. (2019)

La distinction entre des propriétés inhérentes et dynamiques est un acquis dans l'évaluation des fonctions du sol (Seybold et al., 1997). Vogel et al., 2019 sont les premiers à proposer un cadre méthodologique pour évaluer à la fois un « état » et un « potentiel » « à réaliser différentes fonctions », qui permettrait de connaître le niveau de dégradation du sol, c'est-à-dire la marge d'amélioration. Dans notre cadre conceptuel, l'état correspond à la capacité et le potentiel au potentiel. Pour nous, le terme « état » est ambigu, et serait plus général, comprendrait à la fois la valeur des propriétés, le niveau de remplissage des fonctions, et les capacités et potentiels résultants. Un état pourrait être passé, présent et futur (projeté). Par exemple on pourrait dire : « dans son état actuel, il remplit telle fonction à tel niveau. Dans un état projeté où les propriétés sont optimales, le sol remplirait telle fonction à tel niveau. »

La définition du potentiel (« le maximum qu'un sol peut offrir selon ses propriétés inhérentes ») implique l'existence, ou au moins l'hypothèse d'existence, de propriétés optimales (hypothèse que l'on fait également). Une différence que l'on peut voir avec notre cadre conceptuel, est la prise en compte des « facteurs de site » (facteurs environnementaux pour nous) uniquement dans le potentiel (car ce sont des facteurs qui ne changent pas dans le temps, qui sont inhérents), alors que nous avons fait le choix de

les inclure à la fois dans la capacité et dans le potentiel. Autrement dit, Vogel et al., 2019 considèrent que l'état doit être évalué uniquement sur la base de propriétés dynamiques et le potentiel sur la base de propriétés et de facteurs de site inhérents, avec des propriétés optimales, alors que pour nous, la capacité est déterminée par les propriétés dynamiques dans leur état actuel, les propriétés inhérentes et les facteurs environnementaux, et le potentiel est déterminé par les propriétés dynamiques dans un état optimal, les propriétés inhérentes et les facteurs environnementaux.

Tableau 12 : correspondance entre les concepts de notre cadre conceptuel et ceux de Vogel et al. (2019). En italique, on indique les recouvrements partiels.

Concept dans notre cadre	Concept dans Vogel et al. (2019)
<i>Capacité</i>	<i>Etat</i>
Potentiel	Potentiel
Facteurs environnementaux	Facteurs de site

Sécurité des sols (Evangelista et al., 2023)

La sécurité des sols est un cadre qui a émergé dans les années 2010 (Koch et al., 2013) et qui vise à intégrer six challenges « existentiels » dans lesquels les sols sont impliqués dans leur évaluation (McBratney et al., 2014). 5 concepts, les « dimensions de la sécurité », sont alors introduits : la capacité, la condition, le capital, la connectivité et la codification (Evangelista et al., 2023). Seules les deux premières peuvent trouver leur équivalent dans notre cadre conceptuel. Le papier le plus récent sur le (Evangelista et al., 2023) a servi de base pour établir une correspondance entre les concepts.

La définition de fonction du sol est compatible avec la nôtre : « ensemble des processus du sol qui soutiennent la provision de services écosystémiques », bien que nous ayons choisis une définition qui ne se base pas sur les services écosystémiques. Dans notre définition, on insiste sur le fait que ces fonctions sont réalisées indépendamment d'une volonté humaine, mais que les humains peuvent agir sur le sol pour augmenter le niveau de certaines fonctions (moyennant des compromis).

La condition du sol et sa capacité sont définies comme : « l'état actuel et l'état biophysique optimal ». Dans notre cadre conceptuel, le terme « état actuel » renvoie plutôt à un état du sol caractérisé par : la valeur de ses propriétés, les caractéristiques de son environnement, le niveau de remplissage des fonctions, une capacité et un potentiel. L'« état actuel » de la sécurité des sols correspondrait plutôt à une capacité pour l'état actuel, comme on peut le déduire des choix d'indicateurs proposés dans la suite de l'article. La « capacité » de la sécurité des sols correspond au potentiel dans notre cadre conceptuel : pour nous, il n'y a pas de notion d'optimum dans la capacité, qui reflète juste les niveaux de réalisation des fonctions que l'on peut attendre du sol à partir de ses propriétés et de son environnement, indépendamment de son usage.

La différence entre notre cadre et la sécurité des sols est que nous ne proposons pas de méthode d'évaluation, alors qu'Evangelista et al. (2023) donnent pour les trois « rôles » du sol (fonctions, services et menaces) et les 5 aspects de la sécurité une méthode de préférence : l'évaluation via des indicateurs (« propriétés du sol sélectionnées pour évaluer les performances ») et des fonctions scores (comme on peut trouver dans Andrews et al., 2004 ou dans Moebius-Clune et al., 2016).

Tableau 13 : correspondance des concepts entre la sécurité des sols et notre cadre conceptuel. En rouge, on indique les termes qui n'ont pas d'équivalents dans l'un ou l'autre cadre.

Concept dans notre cadre	Concept dans la sécurité des sols
Niveau de remplissage	Pas de correspondance
Capacité	Condition
Potentiel	Capacité
Pas de correspondance	Capital
Pas de correspondance	Codification
Pas de correspondance	Connectivité
Facteur environnemental, facteur anthropique	Pas de correspondance

Capital naturel des sols (Dominati et al., 2010a; Robinson et al., 2009)

Dominati et al. (2010a) et Robinson et al. (2009) ont publié de manière indépendante sur le « capital naturel des sols » et son lien avec les services écosystémiques. Le constat de base est le même : la non prise en compte des sols dans l'évaluation de services écosystémiques, alors qu'ils participent à de nombreux services.

Dans Dominati et al. (2010a), le cadre conceptuel est divisé en cinq parties : le capital naturel, la formation, le maintien et la dégradation de ce capital, les facteurs dirigeant les processus du sol, les services écosystémiques et la satisfaction des besoins humains par ces services. Le capital naturel est défini comme « le stock d'actifs permettant un flux de ressources naturelles ou de services ». Ce sont les propriétés des sols qui constituent le capital naturel. Une mesure de la capacité et du potentiel dans notre cadre conceptuel correspondrait à une mesure (biophysique) du capital naturel. En effet, capacité et potentiel sont indépendants de l'usage et correspondent à des niveaux de fonction que le sol peut remplir dans différents usages et pour différentes pratiques (le « capital ajouté »). Il est implicite dans notre définition que capacité et potentiels s'apprécient à partir des propriétés du sol, comme le capital naturel. La seule différence est que l'on inclut les facteurs environnementaux dans la capacité et le potentiel, alors que le capital naturel se borne aux propriétés des sols. On peut aussi noter qu'une différence est faite entre deux types de propriétés, les propriétés inhérentes et les propriétés « manageables », on aurait donc deux types de capital, un capital inhérent (potentiel) et un capital dynamique (capacité).

Le capital naturel varie dans le temps, une distinction est donc faite entre les « processus de support » qui permettent de maintenir voire d'augmenter le capital naturel, et des « processus de dégradation », qui réduisent ce stock. Ces processus ne sont pas explicités dans notre cadre conceptuel, mais l'amélioration et la dégradation de la capacité et du potentiel correspondent à la formation, au maintien et à la dégradation du capital.

Les facteurs extérieurs présentés dans Dominati et al. (2010a) correspondent à nos facteurs environnementaux et facteurs anthropiques. Les services écosystémiques sont définis comme « les flux bénéfiques qui proviennent des stocks de capital et qui satisfont les besoins humains », qui est plus détaillée que notre définition en « bénéfiques que l'on obtient des écosystèmes ». Enfin, l'aspect d'identification des besoins satisfaits par les services rendus par les sols est compris dans notre cadre dans l'intérêt des différents bénéficiaires de services.

Le capital naturel de Robinson et al. (2009) est légèrement différent. Il précise davantage les différents constituants de ce capital (« stock de masse, d'énergie et leur

organisation qui forment les sols »), mais détaille moins les processus et facteurs à l'origine des variations de stock (Dominati et al., 2010b; Robinson & Lebron, 2010).

Tableau 14 : correspondance des concepts entre le capital naturel des sols (Dominati et al. 2010) et notre cadre conceptuel. En italique, on indique les recoupements partiels.

Concept dans notre cadre	Concept dans le capital naturel de (Dominati et al., 2010a)
<i>Capacité et potentiel</i>	<i>Capital naturel (inhérent, manageable)</i>
<i>Dégradation et amélioration de la capacité et du potentiel</i>	<i>Formation, maintien, dégradation du capital</i>
Facteurs environnementaux et anthropiques	Facteurs extérieurs
Service écosystémique	Service écosystémique
Intérêts des bénéficiaires des fonctions des sols	Besoins satisfaits par les services écosystémiques des sols

References

- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The Soil Management Assessment Framework. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), Article 6. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., Deyn, G. D., Goede, R. de, Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., Groenigen, J. W. van, & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Creamer, R. E., Barel, J. M., Bongiorno, G., & Zwetsloot, M. J. (2022). The life of soils : Integrating the who and how of multifunctionality. *Soil Biology and Biochemistry*, 166, 108561. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108561>
- Directorate-General for Environment. (2023). *DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law)*. European Commission.
- Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010a). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69(9), Article 9. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>
- Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010b). Response to Robinson and Lebron— Learning from complementary approaches to soil natural capital and ecosystem services. *Ecological Economics*, 70(2), Article 2. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.10.002>
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). *Defining and assessing soil quality* (B. A. S. W. Doran D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, Éd.; p. 3-21). SSSA, Madison. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>
- Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability : Managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15(1), Article 1. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6)
- European Environment Agency. (2023). *Soil monitoring in Europe: Indicators and thresholds for soil quality assessments*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/doi/10.2800/956606>

- European Commission. (2006). *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the protection of soil and amending Directive 2004/35/EC*. Publication Office of the European Union.
- Evangelista, S. J., Field, D. J., McBratney, A. B., Minasny, B., Ng, W., Padarian, J., Dobarco, M. R., & Wadoux, A. M. J.-C. (2023). A proposal for the assessment of soil security : Soil functions, soil services and threats to soil. *Soil Security*, 10, 100086. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2023.100086>
- Harris, R. F., Karlen, D. L., & Mulla, D. J. (1996). *A Conceptual Framework for Assessment and Management of Soil Quality and Health* (A. J. J. John W. Doran, Ed.; p. 61-82). Soil Science Society of America, Madison.
- Karlen, D. L., Ditzler, C. A., & Andrews, S. S. (2003). Soil quality : Why and how? *Geoderma*, 114(3), Article 3. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00039-9)
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil Quality : A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), Article 1. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>
- Koch, A., McBratney, A., Adams, M., Field, D., Hill, R., Crawford, J., Minasny, B., Lal, R., Abbott, L., O'Donnell, A., Angers, D., Baldock, J., & Bar, E. (2013). Soil Security : Solving the Global Soil Crisis. *Global Policy*, 4(4), Article 4.
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 544-553.
- McBratney, A., Field, D. J., & Koch, A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203-213. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>
- Moebius-Clune, B. N., Moebius-Clune, D. J., Gugino, B. K., Idowu, O. J., Schindelbeck, R. R., Ristow, A. J., Es, H. M. van, Thies, J. E., Shayler, H. A., McBride, M. B., Kurtz, K. S. M., Wolfe, D. W., & Abawi, G. S. (2016). *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework* (3.2). Cornell University.
- Pankhurst, C., Doube, B. M., & Gupta, V. (1997). *Biological indicators of soil health*. CAB International.
- Rinot, O., Levy, G. J., Steinberger, Y., Svoray, T., & Eshel, G. (2019). Soil health assessment : A critical review of current methodologies and a proposed new approach. *Science of The Total Environment*, 648, 1484-1491. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.259>
- Robinson, D. A., & Lebron, I. (2010). On the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 70(2), Article 2. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.08.012>
- Robinson, D. A., Lebron, I., & Vereecken, H. (2009). On the Definition of the Natural Capital of Soils : A Framework for Description, Evaluation, and Monitoring. *Soil Science Society of America Journal*, 73(6), Article 6. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0332>
- Seybold, C., Mausbach, M., Karlen, D., & Rogers, H. (1997). *Quantification of soil quality*.
- Vogel, H.-J., Eberhardt, E., Franko, U., Lang, B., Ließ, M., Weller, U., Wiesmeier, M., & Wollschläger, U. (2019). Quantitative Evaluation of Soil Functions : Potential and State. *Frontiers in Environmental Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00164>

Annexe 6 : sortie terrain dans le bassin-versant du Rieutort : caractérisation des sols des parcelles expérimentales – compte-rendu

Sortie le 28/06/2023

Présentation

Localisation des parcelles expérimentales et des sondages

Le bassin-versant du Rieutort est situé au Nord-Ouest de Bézier. C'est un des bassins-versants étudiés par le LISAH, notamment dans le cadre du projet Ripp-Viti (Réduire les Impacts des Produits Photosanitaires en Viticulture méridionale à l'échelle territoriale) et de la thèse d'Audrey Naulleau (Naulleau, 2021) (projet LACCAVE, Long term Adaptation to Climate ChAnge in Viticulture and Enology). La connaissance des sols, auparavant limitée à la carte pédologique au 1/100 000 de Lodève (Bonfils, 1993), a pu être complétée lors de différents travaux de prospections. Ces travaux ont mené à une typologie locale des sols (non publiée), qui a été ensuite enrichie à l'occasion d'un stage de M1 (Herbreteau, 2021).

Pour illustrer le cadre conceptuel, des données sur 10 parcelles du bassin versant, collectées dans la thèse d'Audrey Naulleau, vont être utilisées pour évaluer la réalisation des fonctions de régulation de l'eau par les sols. Dans sa description des sols, le modèle WaLIS (Water baLance for intercropped Systems, Celette et al., 2010), utilisé dans la thèse, ne requiert que le réservoir utile (total transpirable soil water, obtenu par inversion du modèle) et une classe hydrologique (pour le Curve Number, déterminé par expertise). Ainsi, la description des sols ne rentrait pas dans le cadre de la thèse. Pour combler ces lacunes et pouvoir recentrer la discussion sur les sols, une sortie terrain a été réalisée le 28/06/2023 (beau temps, pas de précipitations dans les jours précédents) pour réaliser des sondages à la tarière dans les parcelles d'étude et les rattacher à la typologie locale.

La carte de la Figure 1 montre la répartition des parcelles expérimentales dans le bassin versant ainsi que les sondages qui y ont été réalisés. Nous n'avons pas réalisé de sondage pour les parcelles 6 et 8 car : une fosse pédologique y a déjà été étudiée pour la 6, et par manque de temps pour la 8 (de ce que nous en connaissons, elle est

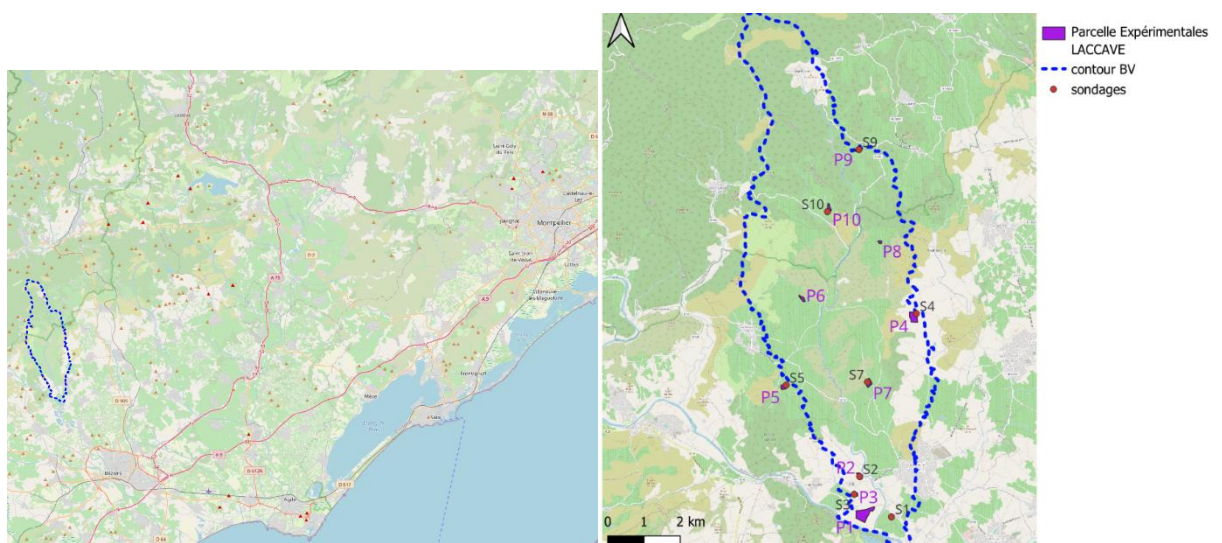
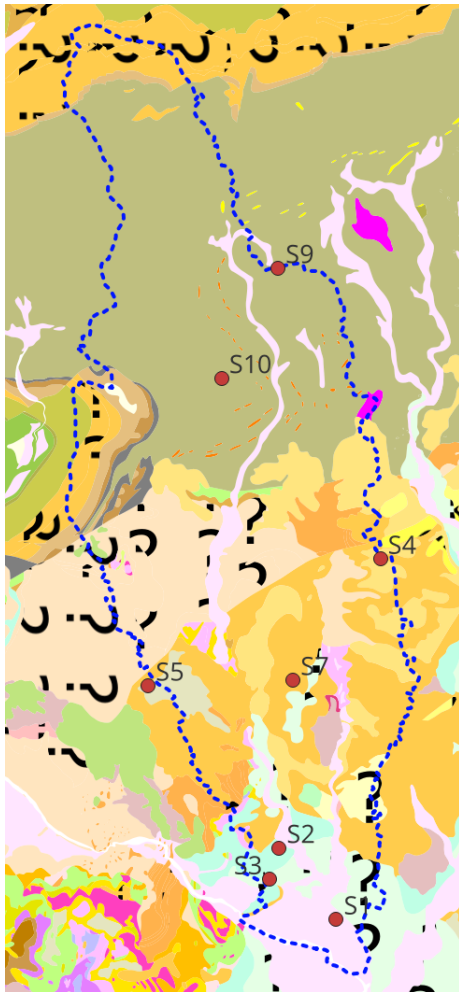


Figure 14 : Localisation du bassin versant du Rieutort à l'Ouest de Montpellier et au Nord de Bézier (gauche). Localisation des parcelles et des sondages dans le bassin versant du Rieutort (contours en bleu) (droite). Fond des cartes : openstreetmap

très similaire à la parcelle 10, qui n'est pas très intéressante). Le sondage n°1 n'a pas été réalisé dans la parcelle 1 par erreur. Le sol correspond toutefois à un sol formé dans le lit majeur de l'Orb, que nous souhaitons caractériser.

Carte géologique au 1/50 000

La carte géologique au 1/50 000 (BRGM, <http://infoterre.brgm.fr/page/cartes-geologiques>) est présentée sur la Figure 15. Par souci de lisibilité, toute la légende n'est pas détaillée, uniquement les ensembles dans lesquels les parcelles apparaissent sur la carte. Cela permet d'illustrer la grande variété de matériaux géologiques que l'on retrouve dans le bassin versant, avec au Nord une majorité de schistes, au centre des formations Eocènes et Miocènes variées et au Sud des dépôts alluviaux plus récents.



N° parcelle	Légende carte géologique
1	Fz : alluvions argilo-sableuses à graviers et galets, limons des terrasses holocènes
2, 3	Fx : Sables et galets consolidés en conglomérats (hautes terrasses glaciaires Riss)
4	g1Co : conglomérats à matrice argilo-sableuse et cailloutis (Oligocène inférieur ?)
5, 7	m3-4m : Molasse sableuse marine, marnes bleues « Helvétien – bassin Molassique – Gigean (Miocène moyen)
6	e6Mco : conglomérats à gros galets de calcaire crétacé (Bartonien)
8, 9, 10	h1-2F : Série flyshoïde schisto-gréseuse des nappes de Mont-Peyroux, Monts de Faugères et des écaïlles de Cabrières (Tournaisien – Viséen)

Figure 15 : localisation des sondages sur la carte géologique au 1/50 000 (gauche) et matériaux géologiques des différentes parcelles obtenus par un repérage sur la carte.

Cette diversité de matériaux géologiques et leur remaniement sous l'effet des cours d'eau, combinée à un gradient d'altitude et climatique (pluviométrie, température) du Nord au Sud sont à l'origine d'une grande variété de sols difficile à appréhender. Plus précisément, l'altitude augmente vers le Nord, les précipitations annuelles sont croissantes et la température moyenne décroissante.

Carte pédologique au 1/100 000

Le bassin versant du Rieutort est couvert par la carte pédologique au 1/100 000 de Lodève (Bonfils, 1993). On peut noter qu'il est précisé dans l'avant-propos de la notice que les facteurs de la pédogénèse sont exceptionnellement variés pour une si faible aire cartographiée (moins de 2400 km²). L'auteur rappelle également que les sols dans cette région sont parmi les premiers sols français à avoir été mis en culture (5000 ans) et s'interroge sur la primauté des facteurs anthropiques dans la pédogénèse : « après 5000 ans de labourage, il est permis de se demander ce qui peut bien rester comme caractéristiques originelles pour la plupart des sols que nous étudions... ».

Dans le Tableau 15, on synthétise les types de sols utilisés dans la thèse d'Audrey Naulleau (dérivés de la carte au 1/100 000) et les sols des parcelles expérimentales tels qu'ils apparaissent sur la carte au 1/100 000. La colonne « observé sur le terrain » donne l'unité pédologique auquel le sol aurait dû être rattaché, au vu des observations de terrain, lorsqu'il y a une ambiguïté à la lecture de la carte. Souvent, ces unités pédologiques ne correspondent cependant pas à la réalité : malgré une légende assez détaillée (et complexe), la carte ne permet pas de capturer toute la diversité des sols du bassin versant (et avec la résolution de la carte, on ne peut pas s'attendre à ce que l'on observe sur le terrain corresponde parfaitement à ce que l'on lit).

Tableau 15 : unité cartographique sur la carte au 1/100000 des sondages réalisés, et rattachement à partir des observations de terrain à ces unités.

Sondage	Type de sol dans la thèse d'Audrey Naulleau (dérivé de la carte au 1/100000, et des perceptions des agriculteurs)	Unité pédologique sur la carte au 1/100 000	Description	Observé sur le terrain
1	Alluvial	82a	82a : Sols peu évolués, profonds, des alluvions du lit majeur de l'Orb et de l'Hérault et de leurs affluents, limoneux, généralement calcaires	82a
2	Sol fersiallitique	Frontière 64-79, 79 avec des sondages précédents.	64 : Sols calcaires lithochromes, cultivés en vigne, profonds, formés sur les marnes miocènes ou sur leurs colluvions. 79 : Sols fersiallitiques à réserve calcique, sablo-argileux appauvris en argile, de cailloutis encroûté des	79 64 et 79 cohabitent sur la même parcelle, la frontière est distinguable à l'œil nu (figure 6).

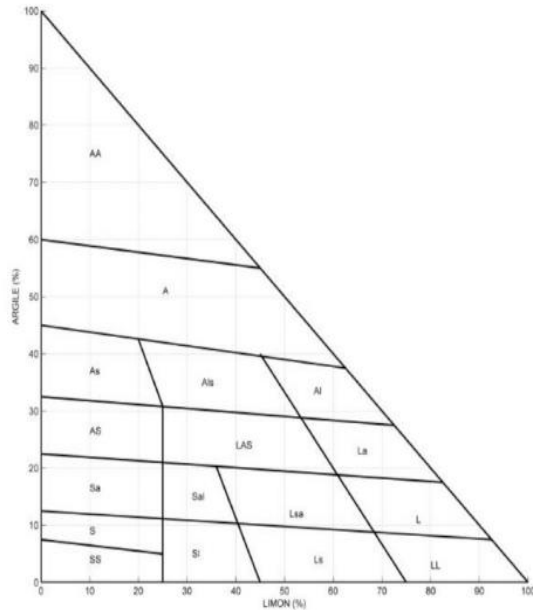
			terrasses moyennes de l'Orb et de l'Hérault.	
3	Sol fersiallitique	Frontière 78/79 carte pédologique, 82a et 79 avec des sondages précédents.	78 : sols calciques, peu rubéfiés, LAS, de cailloutis faiblement encroûté des terrasses basses de l'Orb et de l'Hérault. 79 et 82a : voir plus haut.	79
4	Sol sur marne	Frontière 72/64 carte pédologique, 72 avec des sondages précédents	72 : Sols calciques ou calcaires, de couleur rougeâtre, caillouteux en surface, LSA, de sables et argiles pliocènes reposant sur la molasse helvétique, sur la rive droite de l'Hérault. 64 : voir plus haut	72
5	Sol sur marne	Frontière 63/59	63 : association de sols calcaires, comprenant des sols lithiques, approfondis pour la culture de la vigne et des sols fersiallitiques brun-rouge en poches sur des surfaces karstiques anciennes, formées sur le calcaire laguno-lacustre de l'Helvétien. 59 : Sols calcaires profonds, limono-sablo-argileux, d'alluvions et de colluvions de marnes et de grès du Fuvélien, du Rognacien ou du Vitrolien.	Frontière entre 63 et 64, probablement 64 dans la partie basse de la parcelle.
6 (non réalisé)	Sol superficiel sur marne	57b carte pédologique (pour la parcelle), 57b avec les sondages précédents.	57b : Sols calcaires lithochromes, moyennement profonds, cultivés en vignes, limono-argileux, de marnes versicolores, souvent rouges, du Fuvélien, du	-

			Bégudo-Rognacien, ou du Vitrollien.	
7	Sol superficiel sur marne	72/64 sur la carte pédologique, 72 et 61a pour des sondages proches dans les données (pas dans la parcelle)	61a : sols calcaires lithochromes cultivés en vignes, formés sur des matériaux miocènes ou miopliocènes, sablo-graveleux, peu profonds ou approfondis, de calcaire gréseux, parfois coquilliers ou à dragées de quartz du Vindobonien. 72, 64 : voir plus haut	72
8 (non réalisé)	Sol sur schistes	13/21a carte pédologique (pour la parcelle), 21 sondages précédents	13 : sols bruns modaux, peu à moyennement profonds, caillouteux, limono-sableux, de schistes et schistes gréseux du Cambrien, de l'Ordovicien ou du Viséen, sous maquis, chênaie ou châtaigneraie et sols régolithiques acides et désaturés sous vignes. 21a : Lithosols acides et sols bruns acides, peu profonds, parfois modelés en terrasses, de schistes et de grès limono-argilo-sableux, caillouteux sous chênaie ou châtaigneraie.	-
9	Sol superficiel sur schistes	13/25a carte pédologique, pas d'information d'un sondage précédent	25a : sols bruns, acides et appauvris, moyennement profonds, caillouteux, limono-argilo-sableux, sous maquis et sols régolithiques sous vignes, souvent modelés en terrasses, de colluvions de schistes et de grès.	13

			13 : voir plus haut	
10	Sol sur schistes	13 sur la carte pédologique, 13 pour des sondages proches dans les données	13 : voir plus haut	13

Description des profils

L'objectif de la sortie terrain était d'améliorer les connaissances pédologiques des sols des parcelles qui vont servir à l'exemple d'application du cadre conceptuel. Pour chaque sondage, une brève description est réalisée : localisation de la parcelle, description de la surface, identification et description des horizons par leur couleur, la présence et la nature d'éléments grossiers, la texture (avec le triangle GEPPA), l'effervescence à l'acide et les traits pédologiques (voir Figure 16).



Fiche de description des sols :		Date :		Profil N° : 5	
Autours :					
N° Horizon	1	2	3	4	5
Profondeur apparition (cm)	0	10	20	30	50
Profondeur disparition (cm)	10	60			
Transition forme de la transition					
Humidité : Sec/Praie/Humide/Noyé					
Couleur	Appréciation (brun, rougâtre)	Brun	Brun	Brun	Brun
	Code Munsell	10YR 4/2	10YR 5/3	10YR 5/3	10YR 5/3
Eléments grossiers	Taille (cm)	0-2	0-2	0-2	0-2
	Abondance (%)	5%	5%	5%	5%
Effervescence à HCl (faible, forte)					
Consistance Localisée (CS, Torréfaction)					
Texture	Type / triologie	LS	LS	LS	LS
	Argile (%)	15	20	25	25
Structure	Type				
	Taille				
Pore intra-agrégats : taille / abondance (n/cm ²)					
Chevaux : taille (mm) / abondance (n/dm ²)					
Racines : taille (mm) / abondance (n/dm ²)					
Traits pédologiques	Ravonnements argileux				
	Tacties Roviilles (abondance %)				
	Concrétions Füllin (abond. %)				
Humus : Horizons organiques (nature OL, OF, OH, épaisseur)					
REMARQUES :					

Annexes des cultures à l'hor

Fiche de description des sols : LOCALISATION ET SURFACE

N° : 5

Date :

Coordonnées : X: 430 27 37 49 00 L
Y: 30 57 55 L
Alt: 129

Autour(s) :

Morphologie : Plateau Versant Fond de vallée

Forme de la pente : Rectiligne Concave Convexe

Occupation du sol : Bois Friche
Prairie Temporaire Permanente
Culture en place Nature :
Interculture Labour
Chaume

Vigne
par arrosage

EG de surface : Carbon à l'hor, Calcaire, quelques galets 30%
Erd de surface : Sable de charbon

TYPE DE SOL / RÉFÉRENCES

Figure 16 : triangle des textures GEPPA utilisé dans la description des sols, récupéré de Herbreteau (2021) (haut) ; exemple de fiche de description des sols utilisée sur le terrain (bas).

A partir de ces informations et d'une expertise sur les sols du bassin versant (Philippe Lagacherie), on propose un rattachement à différents systèmes de référence :

- Typologie des sols du bassin-versant du Rieutort développée au LISAH sur la base de plus de 300 sondages et de 7 fosses pédologiques (Herbreteau, 2021), désignée dans le texte par « typologie locale ».
- Référentiel pédologique 2008 (RP) (Baize & Girard, 2008).

- World base reference (WRB) (IUSS Working Group WRB, 2015).

Cette connaissance des sols pourra fournir des pistes d'interprétation et de discussion pour l'exemple d'illustration du cadre conceptuel, qui utilise un nombre restreint de propriétés du sol (réserve utile, CN). On peut déjà préciser que la méthode employée (sondage à la tarière) a ses limites (notamment la profondeur d'observation, limitée dans plusieurs cas par la présence d'éléments grossiers ou par un sol sec, compacté, *etc*), et que certains rattachements sur la base uniquement des observations pourraient se révéler hasardeux, s'il n'y avait pas une bonne connaissance du bassin versant et de ses sols dans le laboratoire.

On pourra remarquer à la lecture du document que les sondages ont été réalisés en général en bordure des parcelles (pour ne pas avoir à marcher jusqu'au centre), on suppose que le sondage est donc bien représentatif de la parcelle.

Sondage 1 – A4



Figure 17 : localisation de la parcelle et du sondage 1 (en haut à gauche), photo de la parcelle 1 (en bas à gauche, qui n'est pas exactement la parcelle 1, voir la présentation) et

Le sondage est réalisé dans le lit majeur de l'Orb, comme en témoigne la position, la situation topographique, l'absence d'éléments grossiers en profondeur, et la texture limono-sableuse faible en argile. A l'époque du dépôt, le courant n'était pas assez fort pour transporter des éléments grossiers, et pas assez faible pour permettre aux argiles de se déposer.

Le sol est relativement jeune, comme l'indique l'effervescence généralisée sur toute la profondeur (pas de décarbonatation). La couleur est 7,5YR43 en surface (brown) et 7,5YR56 (strong brown) en profondeur.

La proximité du talus de terrasse peut expliquer la présence d'éléments grossiers (ronds, acides) en surface, présence qui diminue lorsqu'on s'éloigne du talus.

On n'est pas descendu au-delà de 80cm, ayant atteint un horizon C (ou D) qui est vraisemblablement plus profond. On peut noter que la progression dans les 40 premiers centimètres était particulièrement difficile : cela peut être dû à de la compaction. Le sol était sec en surface, mais plus frais en profondeur.

Le sol est rattaché à l'unité A4 de la typologie locale (Herbreteau, 2021) : « sols d'alluvions récentes du lit majeur de l'Orb et du Rieutort ». Par rapport à la typologie, on a constaté une texture plus limoneuse (Lsa par rapport à SS ou S ou Sa) et une couleur différente : 10YR4(3 ou 4) dans la typologie (brown ou dark yellowish brown). Cela peut correspondre à des nuances de vitesses lors des dépôts.

Dans le RP, ce sol est un FLUVIOSOL carbonaté de lit majeur (bien qu'on ne puisse pas vérifier pour carbonaté qu'il y a plus de 2% de calcite dans la terre fine). Comme on n'a pas d'information sur la structure, on ne peut pas rattacher ce sol aux FLUVIOSOLS BRUTS, JUVENILES, ou TYPIQUES. Dans la WRB, cela correspond aux Fluvisols.

Sondage 2 – A1



Figure 18 : localisation des parcelles et des sondages 2 et 3 (gauche), photo de la parcelle 2 (centre) et du sondage à la tarière correspondant (droite).

La parcelle 2 est située à l'interface entre deux systèmes pédologiques (Figure 18

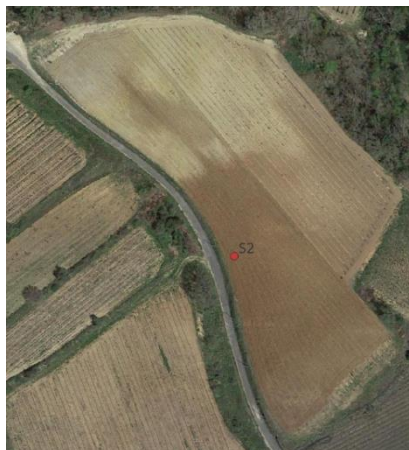


Figure 19 : photographie aérienne de la parcelle 2 (google maps), sur laquelle les deux systèmes pédologiques sont clairement délimités par la couleur du sol.

et Figure 19), selon une pente descendante du Nord au Sud-Sud-Est. Sur la partie supérieure, on trouve les dépôts marins du Miocène (molasse). Sur le bas de la parcelle, ces dépôts ont été recouverts par d'anciens sédiments de l'Orb (terrasse ancienne). Au sol, ces deux matériaux géologiques sont caractérisés par des couleurs différentes : brun-jaune pour les dépôts Miocènes, et brun-rougeâtre pour les dépôts de l'Orb (visible par satellite sur la Figure 19). Le sondage a été réalisé dans la partie basse de la parcelle. En effet, c'est la partie qui semble avoir servi à Audrey Naulleau dans la classification en sol fersiallitique.

En surface, la présence de cailloux arrondis acides indique l'origine (fluviale) du matériau parental. Le sondage est réalisé jusque 60cm, avant que la progression ne soit stoppée par des cailloux. On peut distinguer deux horizons, qui diffèrent par leur couleur (7,5YR44 en surface et 7,5YR46 en profondeur, désignés comme brown et strong brown respectivement). On a une texture plus lourde en surface, avec 30% d'argile environ, alors que le taux d'argile ne dépasse pas 25% en profondeur (Als puis La). Le taux

d'éléments grossiers (petite taille, acides) retiré avec la tarière est le même, d'environ 10%, sur tout le profil. L'horizon supérieur correspond à l'horizon retourné lors de l'arrachage des vignes (40cm). Enfin, on peut noter une faible effervescence de la terre fine sur tout le profil, ce qui peut paraître surprenant pour un sol classé en Fersialsol. Cependant ceci peut être expliqué par une remontée du matériau sous-jacent (les dépôts Miocène, calcaires) sous l'action de la faune (ou des transferts horizontaux par l'eau, mais il n'y a pas de traces de reprécipitations).

La situation de la parcelle (changement de couleur dans le sens de la pente) et l'origine fluviale des éléments grossiers permettent de rattacher le sol au type A1 dans la classification locale : « sols d'alluvions très anciennes ». Par rapport à la typologie, on observe une texture plus faible en argile (As ou A dans la typologie).

Pour la classification dans le RP, on peut proposer un rattachement de type : FERSIALSOL (faiblement) carbonaté. Il pourrait être justifié d'ajouter d'autres qualificatifs, comme « caillouteux » ou « tronqué ». En effet, on observe ce qui semble être un horizon d'accumulation d'argile en surface, ce qui signifierait qu'une partie du sol a été arrachée. Enfin, un des principaux critères pour le rattachement au FERSIALSOL est la couleur (au moins 5YR) alors qu'on observe du 7,5YR... Il pourrait donc s'agir plutôt d'un BRUNISOL à un stade avancé (mais alors il ne serait pas carbonaté...).

Dans la classification WRB, cela correspondrait à un Haplic Cambisol, avec éventuellement des qualificatifs « chromic » pour la couleur rouge, « calcaric » pour carbonaté.

Sondage 3 – A2



Figure 20 : photo de la parcelle 3 (gauche) et du sondage à la tarière correspondant

Cette parcelle est également située sur une terrasse ancienne de l'Orb, mais plus récente (42m d'altitude contre 55m pour la parcelle 2). Sur l'image de gauche de la Figure 20, on peut apercevoir un niveau supérieur de terrasse au fond à gauche.

Il y a davantage d'éléments grossiers en surface (des galets toujours), ainsi qu'en profondeur (régime différent de l'Orb lors des dépôts ?). Avec la tarière, on n'a pas pu descendre au-delà d'une vingtaine de centimètres. La texture, bien que difficile à déterminer, est moins argileuse et plus équilibrée que pour le sondage 2 (SAL). Pour le sondage 2, on suspectait une troncature des horizons appauvris en argile, d'où la texture plus argileuse des horizons qui restent par rapport à la texture de l'horizon de surface du sondage 3 (après, on a vu aussi que la texture dépend largement des vitesses des écoulements lors du dépôt). On observe également une faible effervescence HCl : la décarbonatation n'est pas encore achevée. La couleur est 7,5YR46.

Dans la typologie des sols locale, on a donc un sol de l'unité A2 : « sols des niveaux de terrasse moyenne », avec comme principal argument la position dans le paysage (altitude justifie que le dépôt est plus jeune, et c'est ce qu'on observe sur le profil avec une troncature pour le sol plus âgé, donc avec des processus pédogénétiques plus exprimés).

Pour le rattachement dans le référentiel pédologique et la WRB, c'est le même que précédemment (avec un qualificatif supplémentaire pour la pierrosité importante) : FERSIALSOL caillouteux carbonaté et Haplic Skeletik Cambisol.

Sondage 4 – M9



Figure 21 : localisation de la parcelle 4 (gauche) et sondage à la tarière correspondant (droite). (Par négligence de l'auteur, il manque pour ce sondage une photo de la parcelle.)

Cette parcelle est située sur un plateau dans le secteur Miocène (comme défini dans Herbreteau 2021). On est plus en altitude que les trois précédents : 137m. En surface, on repère des éléments grossiers acides et arrondis, ce qui témoigne d'une origine fluviale de ces éléments. On retrouve une large proportion d'éléments grossiers en profondeur, essentiellement des graviers. La tarière ne permet pas de descendre au-delà de 30 centimètres, la progression étant bloquée par des éléments grossiers. La couleur est brune, légèrement rouge (10YR44 cependant). La terre fine est légèrement effervescente à l'acide, et la texture est LAS, avec une présence faible d'éléments grossiers.

La localisation dans le bassin versant permet d'exclure un dépôt ancien de l'Orb comme origine du sol, qui peut donc être classé dans l'unité M9 : « sols sur dépôts localisés d'âge plio-quadernaire en position sommitales et pentes » (localisation, effervescence, couleur, blocage sur EG à faible profondeur).

Dans la classification du RP, le sol pourrait être rattaché aux CALCISOLS graveleux. Cependant, comme on a pu faire des observations uniquement sur 30 centimètres, il est difficile de juger. Cela correspond à un Hypereutric Skeletik Cambisol dans le WRB.

Sondage 5 – M3



Figure 22 : localisation de la parcelle 5 (en haut à gauche), photo de la parcelle (en bas à gauche), et photo du sondage correspondant (droite).

La parcelle est située légèrement en dehors du bassin versant du Rieutort (quelques dizaines de mètres à l'Ouest). Ce sol est situé sur une pente douce orientée Sud, toujours dans le secteur Miocène (voir la répartition des secteurs dans le rapport d'Arnaud Herbreteau). En surface, on trouve des cailloux « à trous », calcaires, ainsi que quelques galets, avec une abondance moyenne.

Le sondage a été réalisé jusqu'à une profondeur de 80cm, la progression dans un matériau, visiblement l'horizon C, aurait pu être poursuivie, avec quelques difficultés (blocage C2). On distingue trois horizons : un horizon L jusque 40 centimètres, puis un Sca ou Cca jusque 60 centimètres, et enfin un IICca. On remarque le changement de matériau par l'absence d'éléments grossiers dans le matériau II (5% dans les premiers horizons). Pour la texture, on a Lsa puis La et La (si on a bien atteint la marne, il est possible que cette dernière texture ait été mal déterminée, on s'attendrait plutôt à du AI).

Les éléments grossiers extraits sont calcaires, et on observe une forte effervescence sur tout le profil, ainsi que des réprécipitations en profondeur (10% horizon 2 et 20% horizon 2). Dans le matériau II, on observe également des tâches rouilles (10%).

Enfin, pour la couleur, on trouve 10YR44 (dark yellowish brown), 10YR54 (yellowish brown), puis 10YR56 (yellowish brown).

Les observations permettent un rattachement à l'unité M3 de la typologie locale : « sols calcaires moyennement épais sur calcaires lacustres ou calcaires à dragées de quartz ». Cependant, il faut préciser qu'on se situe à la frontière avec l'unité M6 : « sols calcaires sur roches tendres non gréseuses, dont marnes de rivage », les marnes apparaissant à faible profondeur. Avec la pente orientée Sud (Sondage réalisé sur la partie haut de la parcelle, voir photo), on peut supposer qu'une partie des sols de la parcelle sont formés directement sur les marnes et seraient à rattacher à l'unité M6.

Comme pour le sol précédent, le rattachement à un type de sol du référentiel pédologique sur la base des informations dont on dispose n'est pas aisé. Au vu de

l'omniprésence de calcaire sur toute la profondeur explorée, la présence de réprécipitations, on peut proposer un rattachement aux CALCOSOLS sur marnes du Miocène. Il faut également tenir compte de la présence des traits d'oxydation observés sur le terrain : CALCOSOL redoxique sur marnes du Miocène. Dans la classification WRB, on aurait un Calcaric (Stagnic) Cambisol.

Sondage 7 – M3



Figure 23 localisation de la parcelle 7 (en haut à gauche), photo de la parcelle (en haut à droite), photo du sondage correspondant (en bas à gauche, la photo a été prise à l'envers, d'où la perspective étrange) et photo d'un affleurement calcaire sous les arbres en haut de la parcelle (en bas à droite).

La parcelle se situe en pente douce, à proximité d'un sommet local où l'on aperçoit des affleurements de calcaire (formations de rivage Miocène). En surface, on observe une quantité importante (70%) de galets et de cailloux calcaires. La progression à la tarière est rapidement bloquée (à 30cm) par des éléments grossiers (blocage C1), mais selon la propriétaire, il y a une soixantaine de centimètres avant la roche).

Dans la terre que l'on retire, (horizon unique L), il y a une quantité importante de petits éléments grossiers (calcaires, quartz provenant vraisemblablement de résidus de terrasses). La texture est sableuse ou sablo-limoneuse (détermination rendue difficile par l'abondance des EG). La couleur est 10YR44 (dark yellowish brown). Il y a une forte effervescence à HCl.

Ce sol est également un sol de l'unité M3, formé sur les calcaires lacustres. Quelques cailloux de quartz roulés en surface témoignent de la présence initiale d'une terrasse d'alluvions anciennes qui a disparu sous l'action de l'érosion.

Encore une fois, l'arrêt rapide à la tarière rend une classification dans le RP hasardeuse. Ici, il s'agit probablement d'un CALCOSOL caillouteux sur calcaire marin du Miocène, ce qui correspond à un Calcaric (Skeletal) Cambisol dans la WRB.

Sondages 9 et 10 – Sols sur schiste

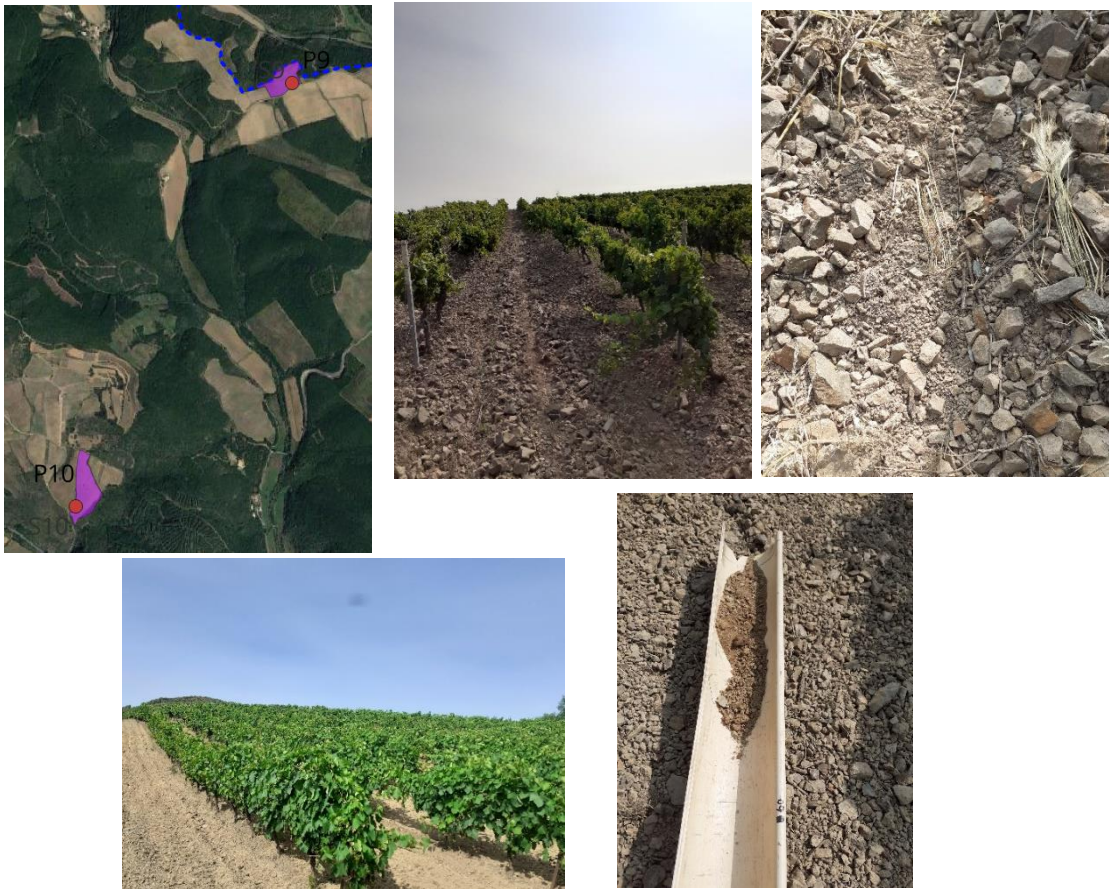


Figure 24 : localisation des parcelles 9 et 10 (en haut à gauche), photo de la parcelle 9 (en haut au centre), et photo du sol de la parcelle 9 (en haut à droite), photo de la parcelle 10 (en bas à gauche) et du sondage correspondant (en bas à droite).

Ces parcelles sont localisées dans le secteur schiste. Pour la parcelle 9, le sol est extrêmement caillouteux (presque 100% de la surface est couverte de cailloux), ce qui a rendu tout sondage à la tarière impossible. Les éléments grossiers sont des schistes, on en retrouve énormément dans la terre. La texture de la terre fine est estimée être SL ou LS, mais la présence nombreuse de graviers rend l'estimation difficile. La couleur est 10YR33 (dark brown).

Pour la parcelle 10, les cailloux sont moins nombreux (80% en surface tout de même) et de taille plus petite. On a pu sonder jusqu'à 40 centimètres. On a retiré très peu de terre (voir figure 11). Pour la texture, on trouve LS (mais même remarque que précédemment, ce n'est pas très fiable), et on a une couleur 10YR54 (yellowish brown). Sur le terrain, on observe que les rangs sont surélevés d'une dizaine de centimètres par rapport aux interrangs, ce qui témoigne d'une activité érosive (rendue possible par des pluies intenses et une forte pente).

C'est typiquement un sol créé artificiellement par l'homme par défonçage au rabe de la roche.

Dans la typologie des sols du bassin versant, ce sont simplement des sols sur schistes (sans discernement). Dans la classification simplifiée utilisée dans la thèse d'Audrey Naulleau (Naulleau, 2021), une distinction entre superficiel (parcelle 9) ou non (parcelle 10) est faite.

Dans la légende de la carte pédologique (Bonfils, 1993), ces sols correspondraient à l'unité 13 : « sols régolithiques sous vignes ». Il est précisé que l'implantation des vignobles a été permis par défoncement, ce qui a remanié les sols (notamment uniformisation de la charge en éléments grossiers). « Ces sols remaniés par l'homme ont été dénommés "régolithiques", car ils sont constitués à 80% par la fragmentation du schiste sur place ». Cela correspond à ce que l'on peut lire sur la carte pédologique et ce que l'on observe sur place.

Dans la classification du référentiel pédologique, on peut justifier un rattachement à la fois aux Peyrosols et aux Anthroposols : ces sols sont constitués sur toute leur épaisseur (atteinte à la tarière) de plus de 60% d'éléments grossiers, et l'origine de ces éléments grossiers est un défoncement pour la mise en culture. On propose donc : PEYROSOL-ANTHROPOSOL TRANSFORME par défoncement sur schistes. Dans la classification WRB, cela correspondrait à un hyperskeletal LEPTOSOL.

Références

- Baize, D., & Girard, M.-C. (2008). *Référentiel pédologique 2008* (E. Quae, Éd.). Association française pour l'étude des sols (AFES). https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2017/11/Referentiel_Pedologique_2008.pdf
- Bonfils, P. (1993). *Carte pédologique de France à Moyenne Echelle : Lodève L-22 : Notice explicative, Carte 1/100 000*. Carte pédologique de France.
- Celette, F., Ripoche, A., & Gary, C. (2010). WaLIS—A simple model to simulate water partitioning in a crop association: The example of an intercropped vineyard. *Agricultural Water Management*, 97(11), 1749-1759. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.008>
- Herbreteau, A. (2021). *Validation d'une typologie de sols simplifiée sur un bassin versant viticole méditerranéen—Rapport de stage*.
- IUSS Working Group WRB. (2015). *Base de référence mondiale pour les ressources en sol 2014, Mise à jour 2015, Système international de classification des sols pour nommer les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques*. FAO, Rome.
- Naulleau, A. (2021). *Co-construction et évaluation de stratégies d'adaptation au changement climatique d'un vignoble méditerranéen* [Theses, Institut Agro Montpellier; Université de Montpellier (UM), FRA]. <https://hal.inrae.fr/tel-03562565>

Résumé

Le changement climatique et l'augmentation de la pression humaine sur les sols affectent leur capacité à remplir des fonctions indispensables à la fourniture de services écosystémiques. Il est nécessaire d'élaborer des méthodes et des outils d'évaluation de ces fonctions pour conseiller et répondre aux interrogations des acteurs du territoire sur la gestion durable des sols. Cependant, les méthodes disponibles se basent sur des concepts variés et reposent souvent sur des non-dits qu'il est difficile d'appréhender. Pour y remédier, un cadre conceptuel pour l'évaluation des fonctions du sol a été élaboré, puis mis en pratique dans une revue bibliographique et illustré avec un exemple d'application. Le cadre conceptuel inclut une représentation du sol et de son fonctionnement, une explicitation des différents utilisateurs du sol et de leurs impacts, ainsi qu'une identification des concepts clés pour la quantification : niveau de remplissage, capacité et potentiel. Pour la revue bibliographique, nous avons sélectionné sur le Web Of Science les publications qui évaluent simultanément plusieurs fonctions. Nous avons constaté que la plupart de ces publications évaluent une capacité. Une lecture à la lumière de notre cadre conceptuel a également permis d'identifier certains manques et faiblesses méthodologiques. Dans l'exemple d'application, le processus d'élaboration d'une méthode d'évaluation à l'aide du cadre conceptuel a été illustré avec l'évaluation de la compatibilité des sols avec la culture de la vigne. Pour cela, les niveaux de réalisation de la fonction d'alimentation en eau de la vigne ont été quantifiés et comparés pour les années 2019 et 2020 pour deux sols contrastés du bassin-versant du Rieutort (Hérault) à l'aide du modèle de bilan hydrique WaLIS. Cela nous a permis de montrer la polyvalence et la plus-value de notre cadre conceptuel dans l'appropriation de la littérature et l'élaboration de méthodes d'évaluation qui répondent aux besoins des acteurs du territoire.

Mots clés : fonctions des sols, cadre conceptuel, évaluation des sols, revue bibliographique, compatibilité à un usage.

Abstract

Climate change and the increasing pressure of humans on soils affect the ability of soils to provide key functions and deliver ecosystem services. Methods and tools to quantify these functions are necessary to provide guidance to land users and policy makers for the sustainable management of soil resources. Available methods, however, are based on a large variety of concepts, and usually rely on implicit conventions that are difficult to grasp. To address this issue, a conceptual framework for the assessment of soil functions was developed, tested through a literature review, and illustrated with a study case. The conceptual framework includes a representation of the soil and its functioning, an identification of its users and their impacts on soil functioning, and a definition of key concept for the quantification. These concepts are the level of fulfilment of a function, soil capacity for a function, and soil potential for a function. For the literature review, we selected papers from the Web of Science that quantified several functions simultaneously. We found that most studies were evaluating a capacity. Replacing assessment methods and tools in the conceptual framework also shed light on some methodological weaknesses. In the study case, we illustrated the development process of an evaluation method with the help of the conceptual framework in the case of soil compatibility with vineyard cropping. Levels of fulfilment of the soil function water supply for vine plants were quantify and compared for the years 2019 and 2020 and two contrasted soil from the Rieutort watershed (Southern France) with the water balance model WaLIS. We showed the versatility and the benefits of our conceptual framework in understanding literature and in elaborating new assessment methods that answer to the needs of land users and policy makers.

Keywords: soil functions, conceptual framework, soil evaluation, literature review, soil suitability.