Projet de recherche participative sur les sols

Rapport de la phase 1 du projet Clés de Sol 2019-2021

Rapport de synthèse

Avril 2022

Projet soutenu par Fondation de France

Pour citer ce rapport

Blanchard A., Brun A., Frey-Klett P., Gascuel C., Lagacherie P., Lemercier B., Louiset R., Sauter J., Serin L., Soulier A., 2022. Rapport de la phase 1 du développement du projet Clés de Sol. Xx pp.

Tables des matières

Introduction 4
I – Historique, genèse du projet 6
II – Objectifs de la phase 1 du projet Clés de sol 7
III – La méthode et les différentes étapes de la mise en place du projet 9
3.1 – Une première écriture des protocoles « sols » retenus 9
3.2 – La démarche de consolidation des protocoles 10
3.3 – Les structures « relai » 10
3.3.1 – La typologie des structures 10
3.3.2 – La formation des huit animateurs 11
3.3.3 – Le rôle des animateurs 12
3.4 – Les boucles d'amélioration des protocoles en différentes étapes 12
3.5 – Les retours d'expériences des animateurs et des bénévoles 13
IV – Les productions du projet 14
4.1 – La mallette Clés de sol 14
4.2 – Les incertitudes associées aux propriétés des sols 14
4.2.1. – Méthode 14
4.2.2. – Résultats 15
4.2.2.1. – Résultats préliminaires : présentation des caractéristiques générales des échantillons de terre sur lesquels les protocoles Clés de Sol ont été mis en œuvre 15
4.2.2.2. – Les variables bien estimées 15
4.2.2.3. – Les variables dont la rigueur d'estimation nécessite une évolution du protocole ... 17
4.2.2.4. – Les variables « difficiles » pour lesquelles un important travail de formation est à réaliser en amont de leur mise en œuvre 19
4.2.2.4.1. – Texture 19
4.2.2.4.2. – Couleur 21
4.2.3. – Enseignements et limites 22
4.3 – Le test de cartographie 22
4.3.1. – Méthode 23
4.3.1.1. – Choix de la propriété de sol à cartographier 23
4.3.1.2. – Construction des fonctions de prédiction et validations 24
4.3.2. – Résultats 24
4.4. – Enseignements 26
V – Enseignements et messages clés du projet Clés de Sol 27
VI – Perspectives 28
ANNEXES 31

Introduction

Le projet de sciences et recherches participatives Clés de Sol est né de différents constats

La recherche a mis au point des modèles numériques de cartographie des sols qui permettent d'estimer des propriétés des sols à partir de diverses informations, sur les sols eux-mêmes et sur le contexte dans lesquels ils se situent. Cette « prédiction » spatiale est assortie d'une incertitude qui se réduit au fur et à mesure que l'information s'ajoute. Les informations locales, hétérogènes, issues des sciences participatives, peuvent-elles apporter une information utile pour produire des cartes plus précises, plus utiles ?

La demande de connaissance des sols est souvent à l'échelle territoriale (l'agriculteur sur son territoire d'exploitation, collectivité territoriale pour son plan d'aménagement, etc.) : quels sont mes sols ? sont-ils fragiles ? de bonne qualité ? Or la puissance publique ne pourra pas aller à cette échelle territoriale (10 000 – 50 000ème) sur l'ensemble du territoire national. Des acteurs locaux vont inévitablement prendre le relais, sur des zones à enjeux (zones péri-urbaines pour limiter l'artificialisation des sols, zones de captage d'eau pour mieux protéger l'eau, etc.).

Même si les sols font l'objet de plus en plus d'attention, ils restent méconnus du grand public. Sensibiliser la société à ce qu'est un sol, à la diversité des sols et de leurs fonctions est essentiel pour les enjeux de biodiversité (les sols sont l'habitat d'une formidable biodiversité), d'aménagement (pour protéger les sols, en lien notamment avec les politiques du zéro artificialisation net), de mode de production agricole et d'alimentation (les fonctions des sols sont très mobilisées dans les démarches d'agroécologie), de contribution à la lutte contre les changements climatiques avec les initiatives comme 4p1000 visant à favoriser la séquestration du carbone dans les sols, etc. Les sols sont au centre de multiples politiques publiques. Créer des outils, des démarches de sciences participatives peuvent contribuer à sensibiliser la société à ce qu'est un sol, aux fonctions essentielles qu'ils remplissent pour la société. Ces enjeux de connaissance des sols s'inscrivent dans la transition écologique.

L'objectif de Clés de sol étant d'améliorer la connaissance des sols à l'échelle des territoires, la construction du projet s'est orientée sur les caractéristiques innées ou intrinsèque des sols, celles liées à la formation des sols (pédogénèse) qui montrent la plus grande stabilité dans le temps, qui sont majoritairement étudiées par le pédologue/cartographe de terrain, peu connues de la société, hors sphère agricole. Par ailleurs, d'autres projets de sciences participatives s'intéressent à la biodiversité du sol, terme bien intégré aujourd'hui. Ces deux types de propriétés sont complémentaires et concourent ensemble aux grandes fonctions écologiques des sols.

Ce projet vise donc à enrichir les bases de données sur les sols, à développer les méthodes de cartographie des sols aux échelles territoriales, à partir d'informations hétérogènes, tout en contribuant à propager dans la société une meilleure connaissance des sols et des enjeux dont ils sont porteurs. Un premier travail d'inventaire des démarches a été fait en 2017 qui avait esquissé le projet Clé de Sol (Jondreville et al., 2018).

Le projet Clés de Sol s'attache ainsi à deux objectifs concrets

- <u>Améliorer la cartographie des sols</u> aux échelles territoriales en développant des méthodes participatives permettant d'enrichir les bases de données existantes, d'améliorer les cartes produites et de faciliter leurs usages ;
- Contribuer à <u>diffuser dans la société</u> une meilleure connaissance des sols et des enjeux dont ils sont porteurs et <u>apporter des outils de connaissances sur le territoire</u>.

Pour ce faire, il s'attache aussi à faire connaître et rendre accessibles les données disponibles sur les sols, à sensibiliser les publics à la diversité des sols et leur permettre d'identifier les principales propriétés et fonctions assurées par les sols.

Le sol tel que pris en compte dans Clés de Sol est un objet original des sciences participatives

Il est complexe à décrire, en trois dimensions. Il a une dimension verticale, nécessitant souvent l'usage d'une tarière ou d'un code couleur pour décrire les différents horizons, l'appréciation de sa texture n'est pas évidente, etc. Il a aussi une dimension horizontale qui se traduit par des variations spatiales rapides, en lien avec le paysage dans lequel il s'inscrit. Par ailleurs, décrire le sol, c'est aussi regarder le paysage, le relief, les usages des sols, etc. C'est un objet large qui ouvre sur de multiples dimensions. Il a un caractère semi-permanent : beaucoup de ses caractéristiques ne changent pas, ou lentement ; l'information acquise est stable et directement intégrable. Dans ce projet, ce n'est pas la mise en évidence d'une évolution temporelle qui est recherchée, mais une densification de l'information dans l'espace. C'est aussi un objet ludique qui peut être manipulé, touché, observé sur le terrain.

Des partenaires de la recherche et de la société se sont rassemblés pour co-construire un projet et co-piloter sa mise en œuvre

Le projet Clés de sol est porté par des acteurs aux compétences complémentaires : chercheurs académiques (INRAE, Institut Agro site de Rennes), réseaux associatifs (Union nationale des CPIE ; France Nature Environnement - FNE), acteurs du développement agricole (Chambre régionale d'agriculture Grand Est - CRA-GE). Ces acteurs sont présents sur différentes régions du territoire français et permettent de couvrir les différents besoins du projet (connaissances scientifiques et pédagogiques, animation de réseaux de bénévoles, public, structures et sols variés).

- L'Union nationale des CPIE est engagée dans la coordination d'acteurs en sciences participatives (co-animation du Collectif national Sciences participatives biodiversité (2012-2017) ; animation du portail web OPEN (depuis 2018)). Elle anime également son propre dispositif de réseau, les « Observatoires Locaux de la Biodiversité », démarche de mobilisation citoyenne en faveur de l'amélioration de la connaissance naturaliste.
- INRAE s'est engagé très fortement dans les actions de sciences et recherches participatives (Houllier et Merilhou-Goudard, 2016), a conforté cet engagement dans sa stratégie 2030, avec un thème dédié à la science ouverte. Un numéro spécial de la revue NOVAE (https://www.inrae.fr/actualites/sciences-recherches-participatives-novae) vient d'être édité sur les sciences et recherches participatives ; un blog est dédié à rassembler toutes les initiatives (https://ist.blogs.inrae.fr/sciencesparticipatives). Trois unités sont impliquées dans le projet, l'UMR SAS de Rennes, l'UMR LISAH de Montpellier et l'unité Tous Chercheurs de Nancy. L'Institut Agro site de Rennes est également partenaire du projet, sous portage INRAE, dans le cadre de son association dans l'UMR SAS de Rennes.
- FNE. Au sein du mouvement FNE, de nombreuses associations portent et/ou animent des programmes de sciences participatives, et depuis 2016 FNE participe au Collectif national Sciences Participatives biodiversité. FNE s'est par ailleurs investie en 2017 dans une campagne européenne de mobilisation autour des enjeux liés au sol, People for soil (People4Soil). Elle a coordonné cette action sur le territoire français, à travers l'Appel du Sol, et l'accompagnement

d'évènement locaux portés par les associations membres de FNE, pour sensibiliser le grand public à l'importance des sols.

- La chambre régionale d'Agriculture Grand Est (CRA-GE) constitue, auprès des pouvoirs publics, l'organe consultatif et professionnel des intérêts agricoles. Sur la question des sols, la CRA-GE est particulièrement engagée. Aux côtés du Gis Sol, elle coordonne et réalise la nouvelle campagne du RMQS[1] dans le Grand Est et en Franche-Comté, et elle est partenaire du programme IGCS[2] qui a conduit notamment à la réalisation des Référentiels Régionaux Pédologiques, dont elle est gestionnaire pour les territoires de Lorraine et d'Alsace. Elle participe à l'animation et au copilotage du RMT[3] Sols et Territoires.

L'ambition de Clés de sols est large et le collectif a souhaité déployer le projet en deux phases bien distinctes. Ce rapport présente les résultats de la phase 1, menée de 2019 à 2021, financée par la Fondation de France dans le cadre de l'appel à projet CO3.

I – Historique, genèse du projet

Dans la phase préparatoire du projet Clés de sol (Jondreville et al., 2018), quatre actions ont été conduites, deux sur lesquelles nous ne reviendrons pas ici, un benchmark des initiatives internationales et une enquête auprès de bénévoles dans les CPIE et structures locales de FNE, pour identifier l'intérêt mais aussi les contraintes telles que perçues par ceux-ci. Les deux autres travaux, sur lesquels ce projet a été développé, sont détaillés ci-dessous.

Un travail de pré-identification d'un panel de propriétés du sol

Le travail collectif a permis de co-construire de manière très préliminaire une première liste de variables et de protocoles expérimentaux. Un document de synthèse (Jondreville et al, 2018 ; https://ist.blogs.inra.fr/sciencesparticipatives/publications) rassemble ces éléments et dresse des propositions concrètes de variables clés :

- La position du site, pour en évaluer la représentativité.
- Le contexte paysager, notamment la position topographique, la pente, la proximité au cours d'eau, les usages des sols... qui vont indiquer, par exemple, la vraisemblance d'une traduction de critère de couleur en propriété d'hydromorphie, la vraisemblance d'une traduction de couleur en teneur en matière organique, en lien avec les usages des sols, les successions culturales...
- La surface du sol, en relation avec la couverture du sol, sa permanence dans le temps, l'éventuel aspect crouté du sol en relation avec des propriétés de stabilité structurale, de battance du sol. La présence de cailloux est également importante en lien avec des enjeux de production agricole. La présence de déjections (turricules de vers de terre) en temps qu'indicatrices de l'activité biologique du sol.

[1] Réseau de Mesures de la Qualité des Sols
[2] Inventaire, Gestion et Conservation des Sols
[3] Réseau Mixte Technologique

- L'épaisseur du sol, mesurée à la tarière, par une gouge ou une simple tige filetée, propriété qui a une grande importance, avec la texture, sur la réserve en eau du sol, l'alimentation en eau des plantes, la lixiviation des solutés comme le nitrate.
- Les couleurs à différentes profondeurs, qui peuvent être un indicateur de la teneur en matière organique du sol, de l'hydromorphie (couleur dominante, hétérogénéité de la couleur, taches de couleur...), indiquant la stagnation de l'eau et son rôle sur les états du fer, du manganèse.
- La texture qui contribue à un grand nombre de propriétés, notamment la réserve en eau du sol, par le biais de la porosité, la stabilité de la structure qui prévient la battance.
- Le pH qui agit sur la fertilité du sol, en lien avec l'activité biologique.

Un travail de structuration du projet Clés de sol selon différentes actions

- Stabilisation des protocoles sur les propriétés identifiées, en les testant avec différents publics
- Gestion des données (aspects juridiques, scientifiques, de diffusion)
- Développements informatiques (base de données, articulation avec les bases de données sol)
- Création et test d'une application mobile (saisie sur outil smartphone...)
- Communication et Animation (logo, site web, site de saisie...)
- Déploiement de l'application (avec un large public, son accompagnement...)

Compte tenu de l'ampleur de ces actions, le collectif a convenu de se focaliser, dans la première phase, sur la stabilisation de protocoles, sur certains aspects de la gestion des données (point juridique), sur le début d'une communication. Un point d'attention a été fortement souligné, sur le fait que faire vivre un projet au-delà de son développement, nécessite un travail conséquent et des moyens notamment pour son animation.

II – Objectifs de la phase 1 du projet Clés de sol

Le projet présenté à CO3 a donc visé la réalisation des premières phases du projet Clés de sol, autour de trois objectifs :

- Stabiliser les protocoles participatifs par des opérations pilotes ;
- Tester la qualité des informations collectées par des non experts et créer les supports pédagogiques et le réseau nécessaires pour l'accompagnement, la mise en œuvre ;
- Préparer la phase de déploiement du projet.

Le premier objectif, celui de stabiliser les protocoles, s'est organisé autour de 2 actions :

- une consolidation sur le fond des protocoles (calibration et validation des méthodes de mesure), qui font appel à des méthodes simplifiées, d'où l'importance de vérifier l'adéquation aux objectifs de cartographie des méthodes proposées. Le laboratoire Tous Chercheurs de Nancy a accompagné cette phase. Des échantillons ont été collectés et des propriétés mesurées selon les méthodes de références (analyses physico-chimiques) et des protocoles simplifiés, selon différents publics, de façon à identifier les erreurs, le domaine de validité des tests et la pertinence des protocoles.
- une consolidation sur la forme des protocoles et des voies de collecte des données. Il s'agissait d'analyser que la donnée est suffisamment attrayante et compréhensible, qu'elle fait sens pour les bénévoles, qu'elle est en accord avec la représentation que se fait le public du paysage et du sol, afin de permettre sa saisie fiable.

Le second objectif, celui de créer les outils pédagogiques et le réseau nécessaires à la mise en œuvre de la démarche, s'est organisé autour de trois actions :

- La consolidation de l'argumentaire scientifique : quelles données pour quel besoin de recherche ? Cet argumentaire éclaire sur les propriétés des sols choisies en relation avec les grandes fonctions (régulation, production…) des sols, sur les implications au lever de propriétés des sols par des non experts, en termes notamment d'incertitude, de cartographie.
- La mobilisation et la formation de différents groupes de bénévoles. Les partenaires associatifs se sont appuyés sur quelques animateurs de leurs réseaux. Ces animateurs ont été formés aux protocoles, notamment par le laboratoire Tous chercheurs. Ils ont eu à leur tour la charge de mobiliser des groupes de bénévoles (« participants testeurs ») pour tester les protocoles et faire un retour d'expérience.
- La conception et le test de supports pédagogiques qui permettent d'expliciter les protocoles, de les rendre accessibles et *in fine* de favoriser l'encapacitation des participants à y contribuer. Ces supports pouvant être, par exemple, des fiches techniques sur les propriétés des sols, une vidéo pédagogique sur les étapes des protocoles à suivre avec la captation d'images terrain.

Le troisième objectif a été de préparer une phase de déploiement du projet, notamment en travaillant sur le cadre juridique des données issues d'une recherche participative sur les sols, sur la cohérence entre les variables, les protocoles et la BDD[4] DoneSol du GIS SOL.

Une fois ce cadre établi, les partenaires du projet prévoyaient de travailler à l'élaboration d'un plan de gestion des données, à un cahier des charges de l'opérationnalisation (saisie sur smartphone...). Cette étape a été juste amorcée et des éléments sont repris dans les conclusions.

Le pilotage administratif et financier du projet a été assuré par l'Union nationale des CPIE pour l'ensemble des partenaires du projet. Elle a été l'interlocutrice directe de la Fondation de France, co-financeur du projet. Elle a créé pour cela les outils de pilotage financiers avec les partenaires et élaboré les conventions partenariales. Deux personnes, de statut auto-entrepreneurs, Annie Soulier et Anne Blanchard, ont été en charge de phases importantes du projet, permettant des engagements variables en temps selon ses différentes phases, l'articulant avec d'autres engagements, ce qui n'a pas toujours été simple pour elles durant les 3 années du projet.

Dans le cadre de CO3, un dispositif de tiers-veilleurs a été mis en place pour l'ensemble des projets que l'association Sciences Citoyennes a contribué à animer. Claude Millier, ancien directeur de recherche d'INRAE, a été choisi par les partenaires de Clés de sol pour être leur tiers-veilleur et il a donc participé à plusieurs des réunions collectives des partenaires Clés de sol.

Une plateforme collaborative a été mise en place par l'Institut Agro, pour partager l'ensemble des documents (protocoles, CR de réunion, présentations...).

[4] Base de données

III – La méthode et les différentes étapes de la mise en place du projet

3.1 – Une première écriture des protocoles « sols » retenus

Comme expliqué ci-dessus, la construction des protocoles s'est orientée sur les caractéristiques « innées » des sols, celles qui montrent la plus grande stabilité dans le temps et qui sont majoritairement étudiées par le pédologue/cartographe de terrain. Elles sont de natures physico-chimique et structurelle.

Étudier les propriétés d'un sol en un point nécessite de bien contextualiser l'information pour pouvoir l'interpréter.

Ainsi la construction des fiches « protocoles » s'est appuyée sur quatre items :

- La logistique : *informations à apporter sur le lieu, et le choix de l'emplacement ;*
- L'observation du milieu et prélèvement des échantillons : *informations sur l'environnement du point d'étude et les modalités de prélèvement des échantillons de sol à différentes profondeurs en fonction du matériel à disposition ;*
- Variables du sol étudiées : *description de la surface du point d'étude, description de la profondeur du sol et des horizons (c'est-à-dire les différentes couches du sol), mesures sur des échantillons de sol en appliquant des protocoles expérimentaux à mettre en œuvre sur le terrain ou bien à la maison.*
- Remontée des données collectées : *formulaire de restitution des résultats.*

Les variables étudiées sont : l'épaisseur du sol, les différents horizons, et, décliné pour chaque horizon, le pH, la texture (2 méthodes retenues), la couleur, la teneur en éléments grossiers (cailloux).

La biologie des sols n'a pas été prise en compte car il s'agit d'une caractéristique très variable dans le temps. Cette thématique est par ailleurs bien traitée par d'autres projets de recherche participative tels que Jardibiodiv', l'observatoire participatif des vers de terre (OPVT),… Des liens pourront être développés, à termes, entre ces différents projets de sciences participatives. Une fiche prenant en compte les paramètres biologiques, selon le protocole « Jardibiodiv' », a toutefois été intégrée dans la démarche. L'ensemble des protocoles s'est décliné dans un premier temps en **12 fiches de quelques pages** chacune, une fiche supplémentaire précise les objectifs du projet et la marche à suivre.

Dans la construction de tels protocoles, il est important d'amener l'observateur à raisonner son choix dans le positionnement du point d'étude et son échantillonnage, de manière que cet échantillonnage soit le plus représentatif possible et utile aux chercheurs. Mais il est aussi primordial de laisser l'observateur s'intéresser à une situation particulière pour satisfaire une curiosité / un intérêt personnel. Cette étape doit aussi permettre de se familiariser avec le sol tout en conservant une approche ludique de la démarche. Pour répondre aux enjeux cartographiques du projet Clés de sol, l'objectif est vraiment d'amener le bénévole à étudier plusieurs sites, plutôt que de multiplier les observations sur un même lieu, pour faire des comparaisons, percevoir la grande variabilité des sols.

Pour tenir compte des différents niveaux d'investissement des bénévoles (temps à passer, matériel disponible) les fiches sont rédigées de manière autoportante, de façon à pouvoir être utilisées seules, sans nécessairement dépendre l'une de l'autre. Des informations identiques peuvent ainsi se retrouver dans plusieurs fiches. Les déterminations sur échantillons ne sont pas obligatoires, mais certaines d'entre-elles sont nécessaires pour répondre aux objectifs cartographiques des chercheurs.

3.2 – La démarche de consolidation des protocoles

L'écriture des protocoles pour amener un bénévole à déterminer certaines propriétés du sol en un point est une première étape mais leur consolidation nécessite une analyse complémentaire qui comprend deux volets :

- Mesurer la qualité et la fiabilité des protocoles : pour cela des échantillons ont été envoyés au Laboratoire d'Analyse des Sols (LAS) à Arras qui a effectué des mesures avec ses propres protocoles et outils de mesure certifiés ;
- Mesurer la perte de précision générée par la mise en œuvre des protocoles par des non experts : pour cela les résultats obtenus par les animatrices et animateurs des structures locales et une personne experte de Tous chercheurs, en réalisant les mêmes protocoles sur des échantillons identiques, ont été comparés.

Ainsi, pour un même échantillon de sol, les données sur les sols sont obtenues par trois voies de détermination différentes : le laboratoire d'analyses des sols de Arras (protocole d'analyse certifié), la détermination par les animateurs considérés comme un public « non expert » (protocole Clés de sol), et détermination selon le même protocole par une personne de Tous chercheurs », considérée comme « experte ». La comparaison des trois résultats obtenus pour chaque échantillon permettant de répondre aux questions détaillées au paragraphe 4.2.

3.3 – Les structures « relai »

Un groupe de huit structures relai a été constitué avec un double objectif : tester la mise en œuvre des protocoles tout en contribuant à leur amélioration et mobiliser des groupes de bénévoles pour une première prise en main de la démarche « Clés de sol ». On désigne par « animateur », la personne correspondante dans chaque structure relai, et par « bénévoles », ou « observateurs » les personnes qu'il a pu mobiliser dans chacune des structures.

3.3.1 – La typologie des structures

Ces structures relai se distinguent par leur réseau d'appartenance (associatif ou non, milieu agricole ou non), leur localisation géographique et le type de bénévoles impliqués (cf. Tableau 1). De plus, chaque animateur possède une expérience en sciences participative et/ou a une connaissance plus ou moins avancée sur le sol.

Tableau 1 : Typologie des structures relai

Structure relai	Localisation	Caractéristique de la structure / orientation des bénévoles
Bio Grand-Est	Région Grand-Est	Animation d'un groupe de maraîchers bio (réseau DEPHY – alternative aux pesticides). Approche actuelle sur la fertilité biologique des sols. Public de maraichers, étudiants licences pro et lycéens.
Chambre d'agriculture des Ardennes	Ardennes	Animation d'un groupe d'agriculteurs DEPHY en polyculture-élevage, et un autre groupe orienté physique du sol, tassement. Animation sur les bassins de captage d'eau potable, intérêt pour mobiliser les acteurs. Public d'agriculteurs.

CPIE Loire-Anjou	Maine et Loire	Accompagnement des collectivités : valorisation des déchets verts, gestion intégrée des eaux pluviales. Intérêt de bénévoles pour le sol via des recherches archéologiques. Public de jardiniers (« Bienvenue dans mon jardin au naturel »).
CPIE des Pays Tarnais	Tarn	Intérêt pour activer un projet sur les sols, activité d'animation en lien avec les problématiques « phytosanitaires » et « gestion de l'eau ». Public de jardiniers, agriculteurs bio et structures en agroforesterie.
CPIE Nancy-Champenoux	Meurthe et Moselle	Intérêt pour appréhender la transversalité du sol en lien avec la gestion de l'eau, l'agriculture. Public de jardiniers (« bienvenue dans mon jardin au naturel »), d'enseignants d'un lycée agricole, grand public.
CREPAN	Calvados	Animation territoriale (territoire des marais) sur la préservation des zones humides. Public d'élus, grand publics et animateurs de territoire.
FNE Savoie	Savoie	Contribution à l'outil pédagogique « le sol m'a dit ». Public d'adhérents, grand public.
Nature 18	Cher	Faire entrer la problématique sol dans plusieurs approches (étude avec des agriculteurs des systèmes de prairies en zones humides, accompagnement des communes sur la gestion des sites naturels et les inventaires de biodiversité). Mobilisation des publics d'élus.

3.3.2 – La formation des huit animateurs

Une formation destinée aux animateurs des huit structures relai a été organisée les 3 et 4 octobre 2019. Encadrée par INRAE, l'Institut Agro et la Chambre d'agriculture Grand-Est, elle s'est déroulée dans les locaux du laboratoire INRAE Tous Chercheurs à Nancy.

L'objectif de cette formation était multiple :

- Échanger autour des enjeux liés à la connaissance des sols, et notamment comment faire coïncider les besoins de données des chercheurs et les réponses qu'attendent les citoyens et groupes locaux en lien avec des problématiques territoriales ;
- co-construire un argumentaire scientifique à destination des bénévoles (intérêt du projet, sa portée éducative, capacité de mobilisation) ;
- Expliquer les attentes du groupe projet aux animateurs, à savoir leur implication dans les tests et la validation des protocoles d'acquisitions d'informations sur les sols (sur la forme et le fond) et la constitution de groupe de bénévoles testeurs.

Sur ces deux journées, les deux tiers du temps ont été destinés à la mise en œuvre des protocoles sur le terrain et en laboratoire. Dans cette première approche les animateurs ont été laissés en autonomie et ont ainsi pu apporter un premier regard critique sur les protocoles proposés alors dans leur version V1, tant sur la forme que sur le fond. L'ensemble des fiches a été mis en pratique et testé.

A l'issue de cette formation, les différentes structures ont eu accès à une plate-forme d'échange collaborative, de manière à pouvoir partager l'ensemble des documents.

La mise en présence de tous les acteurs du projet Clés de sol a été un moment fort et apprécié qui a permis de poser les bases des deux années de travail.

3.3.3 – Le rôle des animateurs

Les animateurs ont eu une place essentielle dans la réalisation du projet Clés de sol et le déroulement de cette première phase.

Leur implication est intervenue à plusieurs niveaux notamment pour comprendre, mettre en œuvre et tester les protocoles en procédant aux premières observations de terrain et pour mobiliser un groupe de bénévoles également testeurs. En itérant les protocoles initiés, ils ont contribué à leur amélioration et leur stabilisation, en fonction des approches de terrain.

Sur la durée du projet, les animateurs ont ainsi été sollicités à plusieurs reprises :

- En octobre 2019, ils ont assisté aux deux journées de formation, apportant ainsi un premier éclairage sur la prise en main des protocoles ;
- De décembre 2019 à février 2020, ils ont réalisé une campagne de prélèvements d'échantillons de sols répartis sur des sites aux caractéristiques différentes (5 points d'étude par animateur et 2 prélèvements par point correspondants à 2 profondeurs différentes). Un total de 80 échantillons a été transmis pour analyse au laboratoire « Tous chercheurs ». L'ensemble des données collectées et les photos ont été déposées sur la plate-forme collaborative ;
- Début 2021, chacun s'est attaché à mobiliser et à former un groupe de bénévoles pour qu'ils testent également les protocoles. Sur la base des échéances proposées, chaque animateur a pu s'organiser en fonction de ses propres contraintes (structurelles, climatiques, propres contraintes des bénévoles).

Leurs retours d'expérience sur l'ensemble de ces étapes ont contribué à évaluer l'intérêt de la démarche. Chaque animateur a reçu les résultats des analyses physico-chimiques transmis par le laboratoire des sols de Arras pour leurs propres échantillons de sols prélevés, en comparaison avec leurs propres résultats. Pour les structures qui en ont fait la demande, l'achat de matériel nécessaire à la mise en œuvre des protocoles a été pris en charge, à savoir une charte Munsell, une tarière et un tamis.

3.4 – Les boucles d'amélioration des protocoles en différentes étapes

Plusieurs versions des protocoles se sont succédées, tenant compte des retours d'expérience des animateurs et de l'analyse des résultats des mesures sur échantillons :

- La version V1 établie pour la formation des animateurs (octobre 2019) a été ajustée sur la base des retours de cette première prise en main. Cela a conduit à la **version V2** (en décembre 2019) qui a été utilisée par les animateurs pour la campagne de prélèvement des 80 échantillons.
- La **version V3** produite en septembre 2020 (retardée en raison des impacts de la crise sanitaire au printemps 2020), intègre les remarques et propositions émises par les animateurs suite à

leur campagne de prélèvements. Plusieurs données demandées et disponibles par d'autres biais ont été supprimées (par exemple le relief, l'environnement géographique du point d'étude…). Cette version est marquée par une forte réorganisation des fiches protocoles de manière à en simplifier leur utilisation (en fonction notamment du matériel dont on dispose, de la réalisation des analyses à la maison ou sur le terrain). Des illustrations ont été ajoutées pour guider le bénévole dans le choix du point d'étude dans son environnement. L'ensemble des documents est présenté sous forme d'une mallette dont la présentation est détaillée au paragraphe 4.1.

- La **version V4**, finalisée en mai 2021, tient compte de l'analyse des résultats obtenus sur les échantillons (laboratoire d'analyse de Arras) et de l'évaluation des incertitudes sur les données acquises par des non experts. La modification phare de cette version est la suppression de l'étape du tamisage et des protocoles qui en découlent (test de la bouteille pour définir la texture du sol, détermination de la teneur en éléments grossiers…). Ces protocoles restent toutefois disponibles dans la mallette et peuvent tout à fait être réalisés quand la nature des sols s'y prête (sols peu argileux par exemple). L'usage de la charte de couleur Munsell a été supprimée, remplacée par l'utilisation de comparateurs de couleurs disponibles sur smartphone. Tous les tests demandés sont, à ce stade, réalisables sur le terrain. C'est cette version qui a été mise en œuvre par les bénévoles des structures.

3.5 – Les retours d'expériences des animateurs et des bénévoles

Les retours d'expérience des animateurs ont été collectés à chaque grande étape de la démarche. Cela s'est fait via un questionnaire d'évaluation des fiches protocoles en avril 2020 (format papier et échange téléphonique individuel), puis par une réunion de synthèse qui s'est tenue en distanciel, le 12/11/2020, réunissant l'ensemble des animateurs et les différents membres du groupe projet. Leurs avis ont été pris en compte dans la construction des différentes versions des fiches et la production de support pédagogiques synthétiques.

Concernant la phase de test des protocoles et leurs premières réalisations, les résultats obtenus les ont confortées dans les difficultés qu'ils ont pu ressentir ou non en fonction, notamment, des différents types de sols rencontrés par chacun et chacune.

Un questionnaire à l'attention des bénévoles a été transmis en juin 2021 en amont de la deuxième campagne d'étude des sols, sous forme framaform avec réponse directement en ligne. Différents questionnements ont été abordés notamment sur la compréhension des diverses fiches, l'importance d'avoir un accompagnement préalable ou non, leur capacité à reproduire l'exercice et l'intérêt qu'ils trouvent à la démarche.

Les retours ont été peu nombreux. Mais globalement, les documents transmis apparaissent clair, avec un vocabulaire adapté. Cependant, les protocoles restent complexes, perçus comme difficiles et longs à mettre en œuvre compte tenu du nombre important de fiches. Le volume d'informations à s'approprier a pu paraître pour certains rédhibitoires. L'accompagnement par une structure relai parait indispensable, a minima pour le prêt de matériel.

IV – Les productions du projet

4.1 – La mallette Clés de sol

Une organisation des protocoles dans une forme de « mallette Clés de Sol » a été créée, avec 4 volets, chacun étant constitué d'un ou plusieurs documents :

- Volet 1 : le projet Clés de sol, contexte et objectifs (informations sur Clés de sol, le rôle des contributeur·trice·s, argumentaires scientifique sur les liens entre les propriétés du sol et ses fonctions, les enjeux de société) ;
- Volet 2 : la prise en main des protocoles Clés de sols par un document d'information pré-opérationnel, qui intègre le volet « cadre juridique » ;
- Volet 3 : les fiches protocoles ;
- Volet 4 : le formulaire de restitution des données.

La conception de la mallette a été concomitante avec la production des fiches V3. La réorganisation a permis de simplifier les fiches et d'en réduire le nombre total, passant ainsi de 12 à 9.

La structuration de cette mallette permet une prise en main progressive de la démarche, évoluant étape par étape dans les protocoles. Elle offre un support relativement complet pour permettre à l'animateur·rice d'avoir en main les différents éléments afin d'expliquer les objectifs du projet aux bénévoles. Elle accompagne le bénévole dans une évolution étape par étape pour se familiariser avec l'objet sol et sa complexité. Cette progression est résumée dans le schéma figurant en annexe 1.

Des vidéos, en mode « tutoriel », viennent illustrer des points précis relatifs à la mise en œuvre de certains protocoles : la pratique du sondage pédologique avec reconstitution de l'échantillon de sol prélevé, le descriptif du matériel nécessaire, les différentes astuces pour un usage optimal de la tarière. L'objectif de ces supports est d'accompagner les animateurs dans leur mission d'information auprès des bénévoles, soit en amont du terrain, lors d'une présentation en salle par exemple, ou alors *a posteriori* pour parfaire la mise en œuvre des protocoles.

4.2 – Les incertitudes associées aux propriétés des sols

L'un des objectifs de cette première phase de Clés de Sol a été d'estimer les incertitudes générées par la mise en œuvre de protocoles scientifiques adaptés à des non experts. Il s'agissait de :

- Mesurer la qualité et la fiabilité des protocoles Clés de Sol ;
- Mesurer la perte de précision générée par le transfert de ces protocoles à des non experts.

4.2.1. – Méthode

Comme décrit précédemment (section III-2-c), les animateurs, après leur formation à Tous Chercheurs – Nancy, ont pu mettre en œuvre les protocoles de Clés de Sol sur différents terrains d'étude lors d'une campagne test de prélèvements. Les échantillons de terre qu'ils ont prélevés au cours de ces interventions ont été :

- Analysés par leur soin, en mettant en œuvre les protocoles Clés de Sol adaptés – les résultats présentés ci-dessous et appartenant à ce groupe sont nommés « ANIM » ;
- Envoyés à Tous Chercheurs, pour que les protocoles Clés de Sol soient mis en œuvre selon le même principe (même matériel que les animateurs) par des experts pédologues – les résultats présentés ci-dessous et appartenant à ce groupe sont nommés « TC » (pour Tous Chercheurs) ;

- Envoyés au Laboratoire d'Analyse des Sols (LAS) à Arras, pour que des mesures puissent être effectuées sur ces mêmes échantillons de terre selon des protocoles normalisés et avec des outils de mesure de laboratoire. Ces résultats constituent les déterminations de référence – les résultats présentés ci-dessous et appartenant à ce groupe sont nommés « LAS ».

Les paramètres pour lesquels des comparaisons ont pu être effectuées par ces trois groupes sont les suivants : texture (avec résultats issus du « test du boudin » et du « test de la bouteille »), pH, calcaire et couleur.

4.2.2. – Résultats

4.2.2.1. – Résultats préliminaires : présentation des caractéristiques générales des échantillons de terre sur lesquels les protocoles Clés de Sol ont été mis en œuvre

Les résultats présentés ci-après résultent d'une comparaison entre « ANIM », « TC » et « LAS » réalisée sur ces échantillons de terre. Le Tableau 2 présente les résultats des paramètres mesurés par le LAS. Ces données permettent de montrer l'environnement pédologique des sols sur lequel les protocoles Clés de Sol ont été mis en œuvre.

Tableau 2 : Données exploratoires issues des échantillons de terre analysés et acquises par le LAS

	Argile	Limon	Sable	pH	Calcaire	Matiere organique	N	C_N	CEC
	%	*%*	*%*	*/*	*g/kg*	*g/kg*	*g/kg*	*/*	*cmol+/kg*
Moyenne	32,0	42,4	25,7	7,0	48,0	42,5	2,3	10,5	19,5
Ecart-type	18,4	17,2	22,5	1,2	112,7	47,9	2,6	2,1	15,6
Coefficient de variation	57%	40%	88%	17%	235%	113%	112%	20%	80%
Minimum	5,9	6,2	0,8	4,2	0,0	2,8	0,3	6,0	2,0
Maximum	91,4	77,2	85,4	8,5	530,0	341,0	17,9	18,2	77,5
Nombre d'échantillons	78	78	78	78	78	78	76	78	78
Valeurs Terres arables (thèse Sophie Joimel)				7,1		31,5	2,3	7,8	

Les résultats indiquent que les échantillons de terre prélevés lors de la campagne test présentent certaines caractéristiques pour lesquelles les coefficients de variation sont faibles, tels que le pH (taux de variation de 17 %) ou encore le rapport C/N (taux de variation de 20 %). À l'inverse, certains paramètres présentent une forte variation. C'est le cas de la teneur en azote, qui présente un coefficient de variation de 112 %, du taux de matière organique dont le coefficient de variation s'élève à 113 %, ou encore du calcaire qui présente un coefficient de variation atteignant 235 %. Ces résultats montrent aussi que certains paramètres agronomiques sont comparables aux valeurs généralement observées sur des terres arables : la teneur en azote, le pH ou encore le taux de matière organique.

4.2.2.2. – Les variables bien estimées

La mesure du taux de calcaire de chaque échantillon de terre a pu être comparée entre le groupe ANIM et TC, qui ont produit une donnée qualitative (effervescence à l'HCl ou non) et le LAS qui a produit une donnée qualitative (taux de calcaire en g/kg rencontré dans l'échantillon de terre analysé).

La Figure 1 montre qu'il existe une différence significative entre les moyennes de taux de calcaire mesurés par le LAS et les moyennes des mesures au test de l'effervescence par TC (test de Student avec p-value < 0,001). L'utilisation du test à l'HCl, selon le contexte défini par le protocole Clés de Sol,

permet ainsi d'obtenir des résultats rigoureux, de l'ordre de ceux mesurés en laboratoire d'analyses des sols.

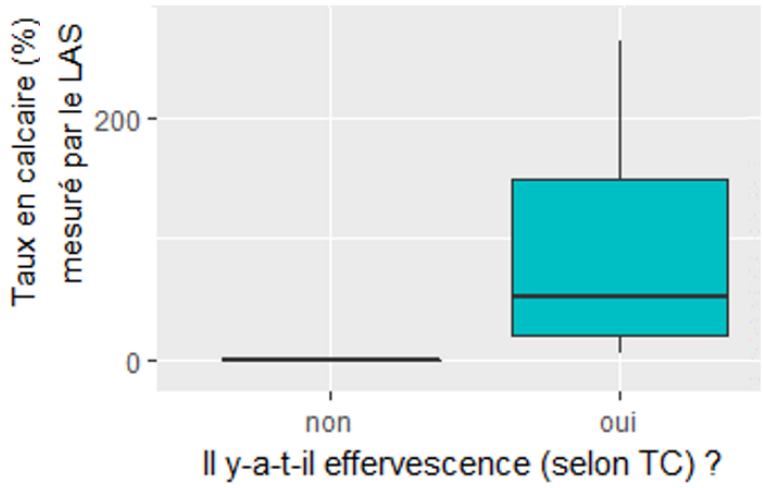

Figure 1 : Comparaison d'une effervescence observée sur l'échantillon de terre (TC) et du taux de calcaire mesuré (LAS) ; n=76

La Figure 2 indique qu'il existe également une différence significative entre les moyennes des taux de calcaire mesurés par le LAS et les moyennes des mesures faites au test de l'effervescence par ANIM (test de Kruskal-Wallis, $p=10^{-13}$). Les échantillons de sol considérés comme « calcaires » par ANIM sont également ceux qui présentent un taux en calcaire le plus élevé, tel que mesuré par LAS. La mise en œuvre du protocole adapté par le groupe ANIM n'entraine pas de perte de précision sur les résultats obtenus par ces « non experts ».

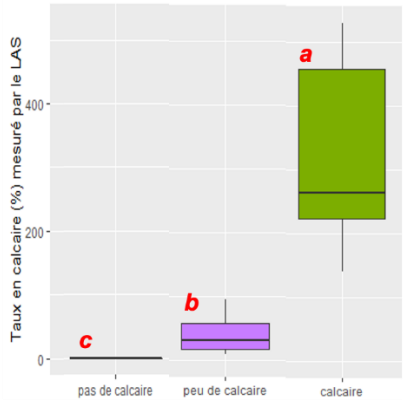

Figure 2 : Comparaison des classes d'effervescence observées sur l'échantillon de terre (ANIM) et du taux de calcaire mesuré (LAS) – pas de calcaire = <10 %, peu de calcaire = entre 10 et 100 %, calcaire = >100 % ; n=76

Cependant, une analyse plus poussée des résultats met en évidence que, s'il existe effectivement une différence significative entre les résultats obtenus par ANIM et par LAS, les résultats obtenus par les « non experts » sont moins précis que ceux obtenus par le groupe des « experts » (TC). La Figure 3

indique que TC estime[5] un sol comme « calcaire » lorsque la teneur en $CaCO_3$ est supérieure à 20 %. De manière différente, ANIM estime[6] un sol comme « calcaire » lorsque la teneur en $CaCO_3$ est égale à 100 %.

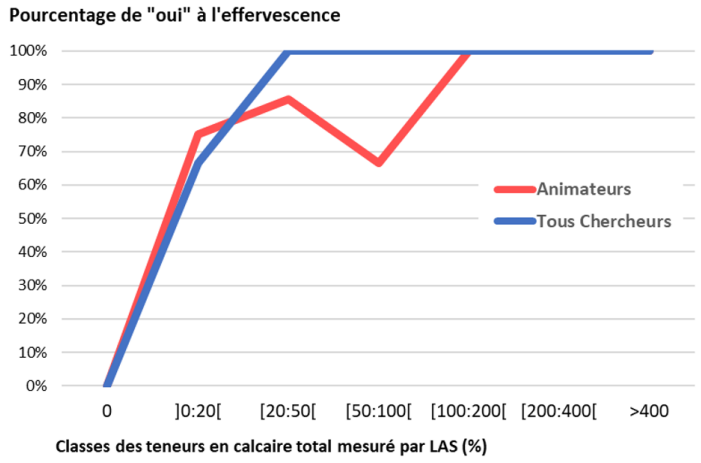

Figure 3 : Pourcentage de « oui » au test de l'effervescence (TC et ANIM) selon différentes classes de teneur en calcaire mesurées par le LAS ; n=76

4.2.2.3. – Les variables dont la rigueur d'estimation nécessite une évolution du protocole

La Figure 4 et le Tableau 3 mettent en évidence qu'il existe une différence significative entre les pH mesurés par TC et ANIM (à l'aide d'une bandelette pH) et ceux mesurés en laboratoire par LAS (test de Student sur échantillons appareillés, p-value = 0,002 pour TC et $<10^{-8}$ pour ANIM).

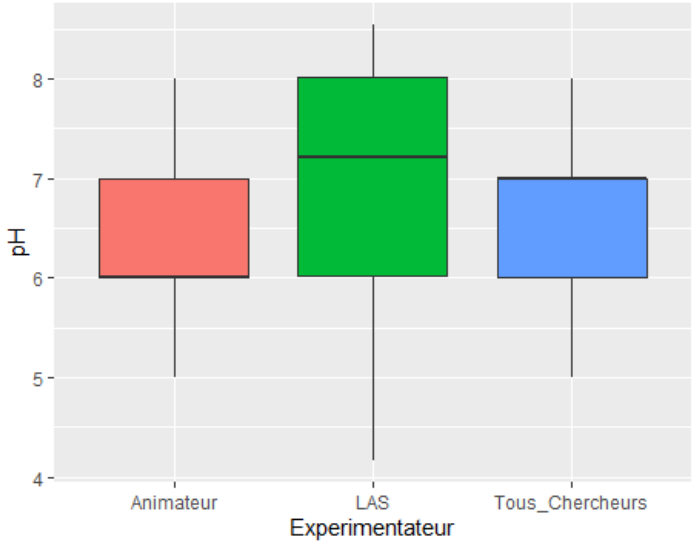

Figure 4 : Comparaison des valeurs de pH obtenues par TC et ANIM avec celles du LAS ; n=76

[5,2] C'est-à-dire que 100 % des réponses au test calcaire sont « oui »

Tableau 3 : Résultats issus des analyses statistiques effectuées sur les résultats pH obtenus par TC et ANIM ; n=76

	TC	ANIM
EQM	0,69	1,36
R^2	56 %	35 %
p-value (Student)	0,002	10^{-8}

La Figure 5 et ce Tableau 3 montrent que les valeurs pH mesurées par TC sont mieux corrélées avec les valeurs de référence du LAS (R^2 = 56 %) que celles mesurées par ANIM (R^2 = 35 %), traduisant pour ce paramètre, une perte de précision lors du passage du protocole Clés de Sol à un groupe de « non experts ».

Enfin, la Figure 4 complétée de la Figure 5, permettent d'aller un peu plus loin dans l'interprétation de cette comparaison. Elles mettent en évidence qu'il existe une surestimation des valeurs lorsque le pH de l'échantillon de terre est inférieur à 6,3 et une sous-estimation lorsque celui-ci dépasse 6,3.

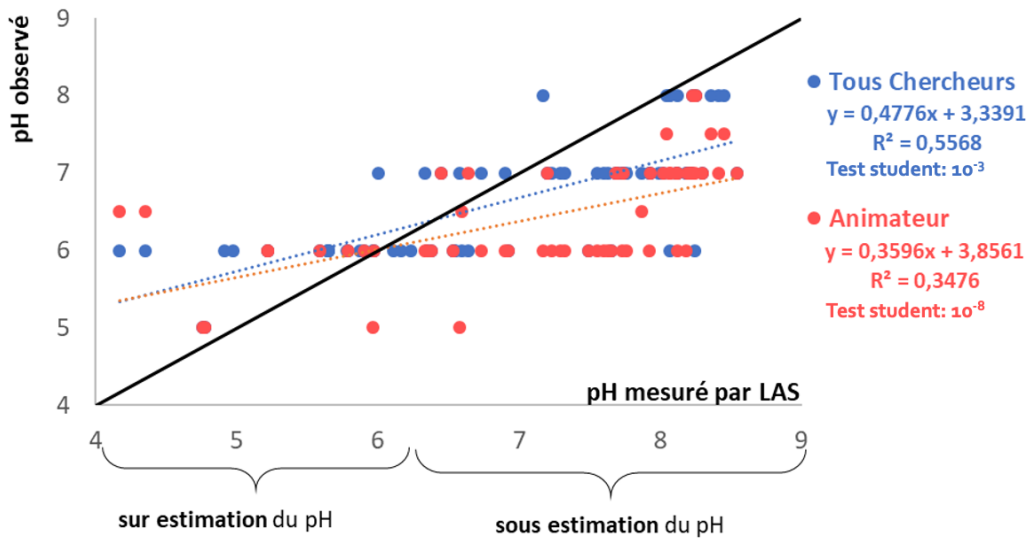

Figure 5 : Corrélations entre les valeurs mesurées par LAS et les valeurs observées par ANIM et TC (bandelette pH) ; n=76

Il faut mettre en corrélation ces résultats avec les données pédologiques des échantillons de terre sur lesquels ces tests pH ont été effectués, mais également avec le matériel utilisé lors de ce protocole. En effet, les données exploratoires présentées précédemment indiquent que le pH moyen des échantillons de terre se situe autour de 7,0 et que c'est un paramètre qui varie peu entre tous les échantillons analysés (coefficient de variation = 17 % - Tableau 2). A ce titre, cette différence significative observée entre les résultats TC et ANIM et les résultats de référence peut être la conséquence de cette homogénéité des pH des échantillons considérés, mais également de l'utilisation des bandelettes pH, qui indiquent le résultat sous forme de couleur à comparer avec un référentiel et qui donc, dans le cas de pH homogènes, ne permet pas de mettre clairement en avant une différence significative entre un pH de 6 et un pH de 7. A ce titre, ce paramètre est placé dans les « paramètres dont le protocole doit évoluer », notamment en considérant l'utilisation d'un nouvel outil de mesure tel qu'une sonde pH, qui pourrait remplacer l'utilisation de la bandelette pH et donner un résultat

quantitatif (chiffré) et non qualitatif, qui serait alors plus précis et donc plus discriminant. A défaut, l'utilisation de bandelettes ne pourra mettre en avant que de très fortes variations.

4.2.2.4. – Les variables « difficiles » pour lesquelles un important travail de formation est à réaliser en amont de leur mise en œuvre

4.2.2.4.1. – Texture

Le Tableau 4 présente les indices d'accord entre les résultats obtenus par TC et ANIM selon les deux méthodes mises en œuvre pour mesurer la texture des échantillons de terre, et les valeurs de référence calculées par LAS. Ces informations mettent en évidence trois éléments :

- Le test du boudin, qu'il soit mis en œuvre par des experts ou des non experts, présente un indice de concordance plus élevé que celui du bocal. A ce titre, l'indice de concordance entre les valeurs de référence du LAS et celles obtenues par TC grâce au test du bocal indique une concordance de résultats égale à 51 %, mettant en exergue la plus faible précision du protocole du bocal par rapport à celui du boudin ;
- Les résultats obtenus par TC avec le test du boudin témoignent d'une concordance de 65 % avec les valeurs référence mesurées par LAS. Si ce test semble le plus rigoureux en comparaison de celui du bocal, cet indice de concordance peut paraitre « faible » ;
- Qu'il s'agisse des résultats apportés par le test du boudin ou du bocal, l'indice de concordance est toujours plus élevé pour TC *versus* LAS que pour ANIM *versus* LAS. En effet, les indices de concordance sont très faibles pour ANIM, respectivement 0,02 pour le test du boudin et -0,3 pour celui du bocal. Ces résultats soulignent la perte de précision très importante engendrée par la mise en œuvre de ces protocoles par des « non experts ».

Tableau 4 : Indices de Cappa de Cohen (K) obtenus à la suite de l'analyse statistique des résultats de texture mesurés par les méthodes du boudin et du bocal par TC et ANIM en comparaison avec les valeurs de référence LAS ; n=76

	TC		**ANIM**	
Test appliqué pour évaluer la texture	Test du boudin	Test du bocal	Test du boudin	Test du bocal
K (Cappa de Cohen)	0,65	0,51	0,02	-0,3

Des analyses statistiques complémentaires permettent de mettre en évidence quelques premiers éléments pouvant expliquer cette perte de précision. Le Tableau 5 présente les coefficients de détermination (régression) et les p-values (test de Student sur échantillons appareillés) obtenus par TC et ANIM par rapport aux valeurs de référence LAS et présentés pour chaque particule d'argile, limon et sable.

Tableau 5 : Coefficient de détermination (régression) et p-value (test de Student sur échantillons appareillés) obtenus en comparant les valeurs mesurées pour « argile », « limon » et « sable » par TC et ANIM par rapport aux valeurs de référence LAS ; n=76

	TC			**ANIM**		
Particules	Argile	Limon	Sable	Argile	Limon	Sable
R^2 (%)	24	36	11	13	1	1
p-value	10-8	0,27	0,002	0,23	0,40	0,18

Ces résultats permettent de montrer que TC sous-estime la teneur en argile (p-value < 10^{-8}) et par conséquent surestime la teneur en sable (p-value < 0,001) (Figure 6). De la même manière, les résultats issus des analyses réalisées par ANIM témoigne du fait que le groupe de « non experts » surestime la teneur en sable (p-value = 0,18) et par conséquent sous-estime celle en argile (p-value = 0,23) (Figure 6). Il y a quelques incertitudes pour la teneur en limon, les valeurs mesurées par TC n'expliquent que 35 % de la variabilité des taux de limons mesurées par le LAS.

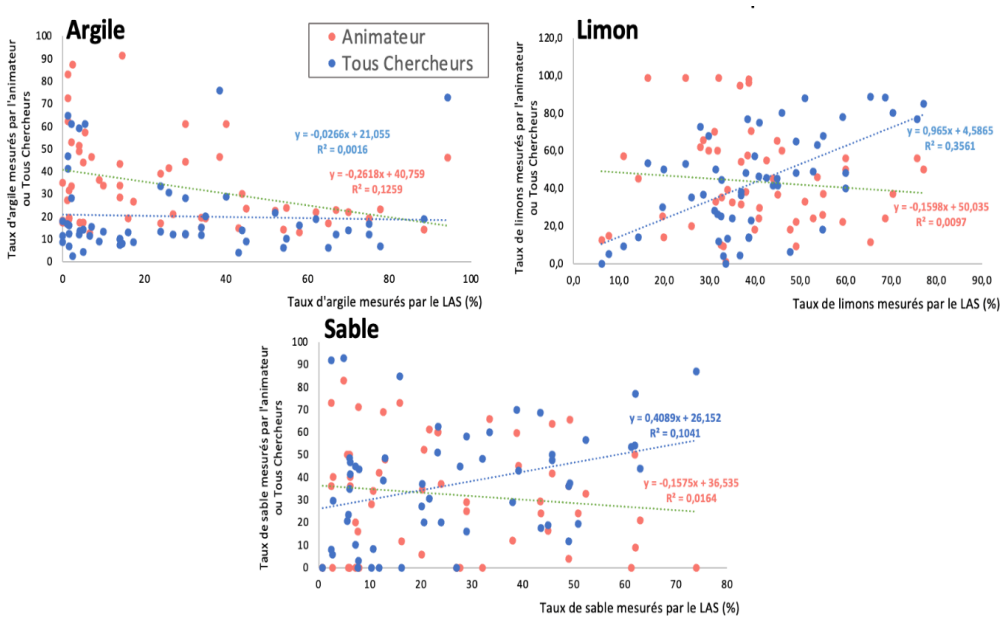

Figure 6 : Taux d'argile, de limon et de sable mesurés par le LAS et par TC et ANIM ; n=76

Cette comparaison (Figure 6) souligne qu'il existe très peu de corrélations entre les valeurs mesurées et les valeurs observées par les deux groupes d'expérimentateurs en comparaison avec les valeurs de référence du LAS. Au mieux, ce sont les résultats du taux de limon mesurés par TC qui indiquent la plus forte chance de prédire un résultat rigoureux : 35 % (avec une pente proche de 1).

Enfin, d'autres analyses statistiques permettent d'expliquer cette perte de précision engendrée par la mise en œuvre des protocoles Clés de Sol par des groupes d'experts ou de non experts. La Figure 7 met en effet en évidence que les erreurs engendrées par le test du boudin, qu'ils s'agissent du groupe d'expérimentateurs TC ou ANIM, sont plus importantes lorsque les teneurs en argile, limon ou sable sont plus importantes.

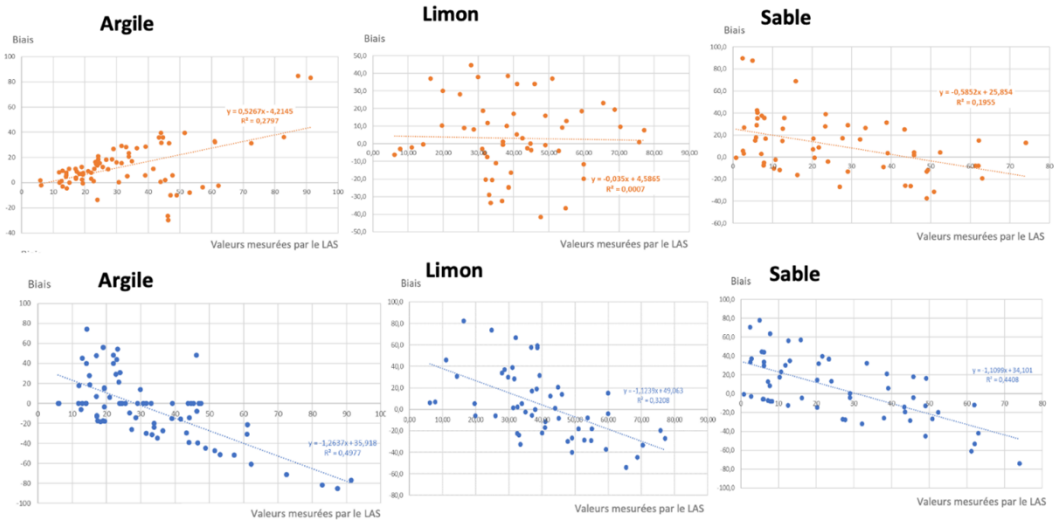

Figure 7 : Biais issus des mesures d'argile, limon et sable par TC (orange) et ANIM (bleu) grâce au test du boudin, par rapport aux valeurs de référence LAS ; n=76

4.2.2.4.2. – Couleur

La Figure 8 met en évidence une corrélation entre les couleurs attribuées par TC et le taux de matière organique mesuré par LAS : la couleur s'assombrit au fur et à mesure que les échantillons de terre présentent un taux de matière organique élevé. Ce résultat permet d'appuyer la pertinence de l'utilisation du protocole Clés de Sol.

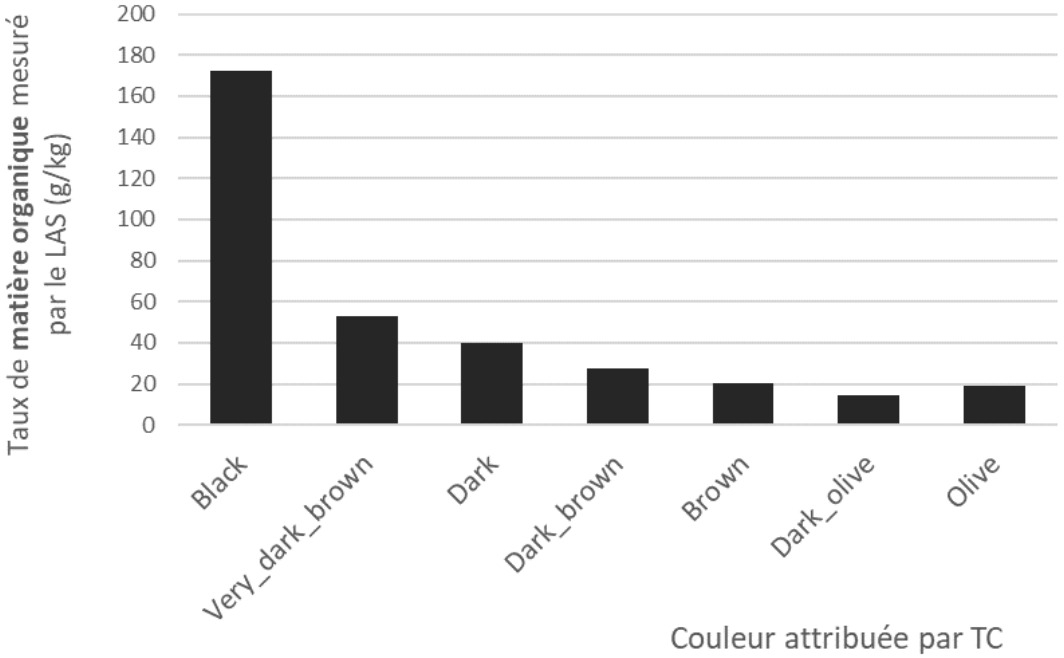

Figure 8 : Comparaison entre le taux de matière organique mesuré par LAS et la couleur attribuée par TC à l'aide de la Charte Munsell ; n=20

Cependant, la comparaison des couleurs observées par TC et par ANIM, met en évidence un fort désaccord entre les résultats rendus par ces deux groupes (Figure 9). En effet, le test de Kappa de Cohen présente un indice statistique K inférieur à 0 (K=-0,15), traduisant ainsi un désaccord

d'observation entre ces deux lots d'échantillons. À ce titre, ces résultats traduisent une perte de précision générée par l'utilisation de ce protocole par le groupe de « non experts ». Une formation à l'utilisation de la Charte Munsell par des non experts serait à réaliser.

	Animateur					
TC	Brown	Dark_brown	Pink	Reddish_brown	Dark_olive	Very_dark_brown
Brown	3	2	0	1	0	0
Dark_brown	1	4	0	0	0	3
Pink	0	0	0	0	0	0
Reddish_brown	0	0	0	0	0	0
Dark_olive	1	0	1	0	0	0
Very_dark_brown	0	3	0	0	0	1

Figure 9 : Comparaison des couleurs observées par TC et ANIM grâce à l'utilisation de la Charte Munsell ; n=20

4.2.3. – Enseignements et limites

Les analyses statistiques réalisées sur les trois groupes de résultats ANIM, TC et LAS ont permis de mettre en évidence les protocoles Clés de Sol pour lesquels la fiabilité des protocoles est de haut niveau, par exemple la mesure du taux de calcaire.

Ces analyses ont également mis en évidence des protocoles « à améliorer », par l'utilisation d'un nouvel outil de mesure, par exemple pour le pH, en remplaçant peut-être la bandelette pH par une sonde pH, ceci permettant d'acquérir un résultat chiffré, donc normalement plus précis.

Enfin, ces analyses statistiques ont permis de mettre en évidence qu'il existe certains protocoles où on a une perte de précision de la donnée entre si elle est récoltée par des experts pédologue ou par des non experts. Cette perte de précision peut être expliquée :

- Par un manque d'expérience de l'utilisateur du protocole (par exemple, la détermination de la couleur ou encore de la texture par le test du boudin) ;
- Par un manque de rigueur de fond du protocole (par exemple, le test du bocal) ;
- Par un contexte pédologique spécifique (par exemple, une teneur élevée en argile, limon ou sable).

Ceci pourrait être confirmé ou non par la réalisation d'analyses statistiques complémentaires (en étudiant par exemple le contexte calcaire ou non des échantillons de terre).

Pour ces protocoles, un travail supplémentaire de rédaction, d'illustration et de formation doit être réalisé, de sorte à pouvoir les faire évoluer et gagner en fiabilité, avant d'être à nouveau testés auprès d'utilisateurs experts et non experts en sciences du sol. Ces résultats complémentaires pourront également impliquer une nécessaire formation spécifique, notamment à l'utilisation de certains outils de mesure (par exemple, Charte Munsell).

4.3 – Le test de cartographie

Il est bien connu des spécialistes de cartographie des sols que la précision des cartes de propriétés de sol issues de démarches de cartographies des sols par modélisation statistique (CSMS) est principalement limitée par une trop faible densité spatiale des observations de sol sur les territoires à cartographier. Pour augmenter ces densités spatiales et ainsi mieux représenter les variations locales de propriétés de sols, on peut envisager de recourir à des groupes de citoyens qui pourraient compléter/suppléer le pédologue dans ces tâches d'observation. Les travaux décrits précédemment ont montré que des citoyens guidés par des protocoles d'observation adaptés (Mallette Clés de sol)

peuvent recueillir des observations de sol sur un ensemble de sites moyennant une incertitude qui a été quantifiée (voir paragraphes précédents). Il était donc logique d'essayer de déterminer quel pourrait être l'impact de cette incertitude sur les cartes de propriétés de sol qui pourraient être produites en alimentant les modèles de CSMS avec cette nouvelle source d'observations de sols, celles de non experts des sols.

Il n'était pas possible d'expérimenter en vraie grandeur une approche de CSMS impliquant des citoyens. En effet, cette expérimentation aurait nécessité à la fois des données « sol » collectées par les citoyens et des analyses de sol pour valider les résultats dont les volumes nécessaires dépassaient largement les moyens du projet. L'alternative retenue a été de mener une expérimentation virtuelle simulant l'utilisation de données citoyennes sur un petit territoire (commune de Bouillargues, Gard) où nous disposions déjà d'un volume important d'observations qualitatives de sol (2 765) sur un territoire contrasté au niveau pédologique (Figure 10).

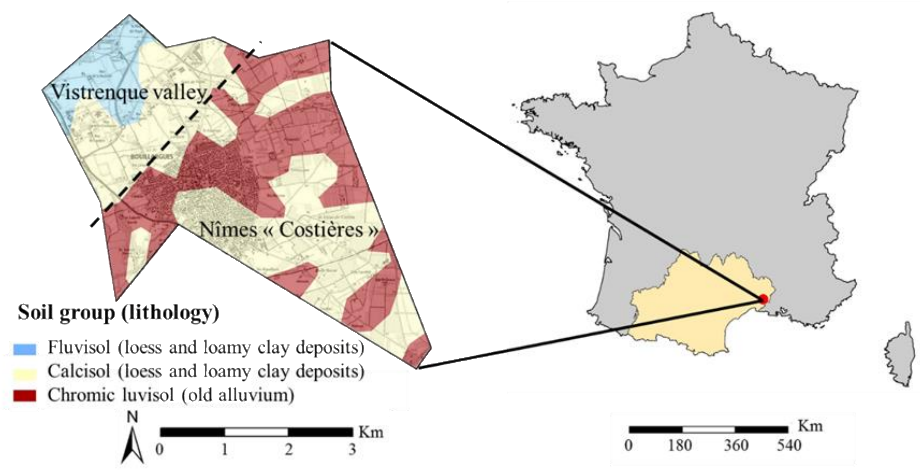

Figure 10 : Localisation de la commune de Bouillargues (30) et carte des sols sur le site test

L'expérimentation virtuelle a consisté à simuler un recueil massif de données citoyennes nécessaires à la CSMS en perturbant les observations de sol disponibles de façon à reproduire les incertitudes d'observation mesurées lors du test effectué avec les non experts (voir paragraphes précédents). Ces observations de sol ainsi perturbées ont été utilisées pour construire des fonctions de prédiction de propriétés de sol dont les performances ont été comparées avec celles estimées en utilisant les observations de sol non perturbées, censées représenter des données recueillies par des experts. Nous donnons dans la suite des détails sur l'approche menée et les résultats obtenus.

4.3.1. – Méthode

4.3.1.1. – Choix de la propriété de sol à cartographier

Parmi toutes les propriétés de sol faisant l'objet d'observations de bénévoles, notre choix d'expérimentation était limité par les contraintes suivantes :

- La propriété de sol testée devait être à la fois effectivement observée sur la zone d'étude et considérée dans les tests d'incertitudes menés à l'étape précédente ;
- La propriété testée devait être suffisamment variable sur la zone d'étude pour qu'une cartographie ait du sens ;

- Les tests d'incertitudes effectués sur cette propriété devaient être réalisés sur un nombre suffisant d'échantillons pour une bonne quantification des incertitudes introduites dans les données d'observation de sol.

La prise en compte de ces trois contraintes a conduit à sélectionner la texture de sol mesurée à 65 cm de profondeur, avec deux seules modalités. Ce regroupement de modalités par rapport à une détermination usuelle de texture du sol a été nécessaire pour satisfaire la troisième contrainte citée précédemment. Sur la base des tests d'incertitude réalisés à l'étape précédente, deux niveaux d'incertitudes d'observation ont été considérés : observateur « expert » (incertitude modérée, 85 % de classes bien identifiées) et « observateur non expert » (incertitude forte, 58 % de classes bien identifiées).

4.3.1.2. – Construction des fonctions de prédiction et validations

Sur les 2 765 observations de sol, 276 (10 %) ont été réservées pour la validation des fonctions de prédictions. Le reliquat a été utilisé pour construire les estimations utilisant un algorithme d'apprentissage automatique connu pour son efficacité en CSMS, dénommé « forêts d'arbres aléatoires de classification » (« Classification Random Forest »). Les estimations ainsi construites délivrent en chaque point de l'espace une estimation de la propriété d'intérêt (ici la texture du sol à 65 cm de profondeur, selon deux classes) à partir de données spatiales (Modèle numérique de terrain, images de télédétection, …) disponibles de façon exhaustive sur la zone étudiée. Ces données spatiales sont sélectionnées automatiquement par l'algorithme comme les plus efficaces pour estimer cette propriété de sol parmi un ensemble de données spatiales.

Trois types d'estimation, générant trois cartes de texture à 65 cm de profondeur, ont été construites : une de référence construite avec des données sol non perturbées (« fonction de référence »), et deux construites avec des données sols perturbées selon deux niveaux d'incertitude (« fonction expert » et « fonction non expert »). Les performances de ces trois fonctions ont été évaluées à partir des 276 observations de sol réservées, en calculant la précision totale (ou accuracy) mesurant le pourcentage de bonnes estimations.

L'utilisation de données « expert » a également été testée en considérant des volumes de données recueillies plus petits, et donc plus réalistes à collecter pour un groupe de citoyens dans une commune donnée. De 10 % à 90 % des observations de sol disponibles ont été échantillonnées de façon homogène sur la zone d'étude (échantillonnage stratifié géographiquement). Des estimations de la texture du sol à 65 cm ont été construites à partir de différents volumes d'observations de sol. Leurs performances ont été évaluées comme décrit précédemment, et comparées avec les performances d'estimations construites avec les volumes d'observation de référence.

4.3.2. – Résultats

L'appréciation visuelle des cartes ainsi que l'évaluation quantitative du pourcentage de bonnes estimations (Figure 11) montrent une dégradation modérée des résultats lorsque les observations de sol de référence sont remplacées par des observations d'experts, mais une dégradation forte lorsque sont utilisées des observations de sol non experts.

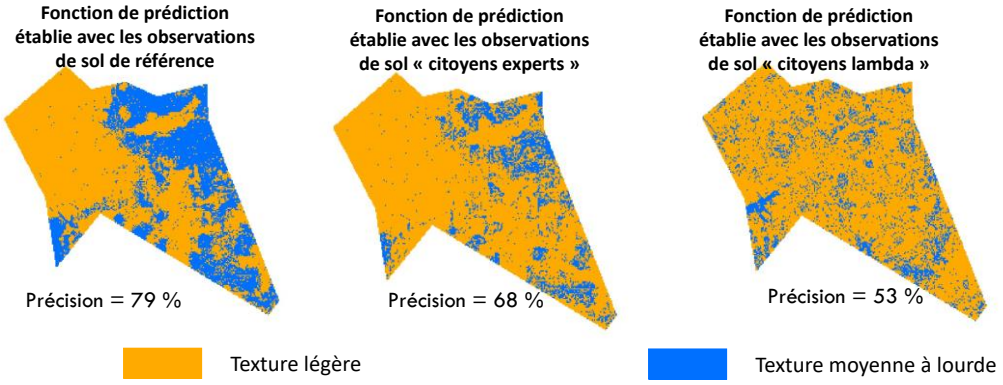

Figure 11 : Carte des sols selon les 3 méthodes sur le site tests, et précision associée

D'une façon générale, les performances semblent modérément affectées par le volume de données, qu'elles soient issues d'observations de référence ou d'observations d'experts (moins de 10 % de variation des performances). Les variations observées sur le graphique (Figure 12) doivent être interprétées avec précaution du fait de la marge d'erreur sur l'évaluation des performances de CSMS montrées dans des études précédentes[7].

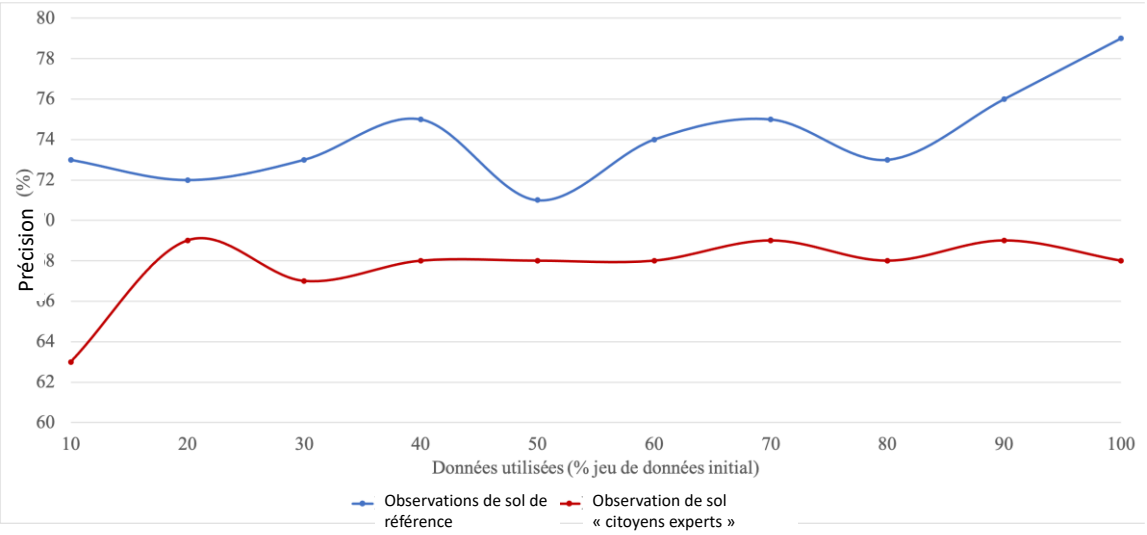

Figure 12 : Estimation de la précision des résultats en fonction du volume de données

Ce résultat, apparemment surprenant, s'explique par le fait que les estimations de texture de sol sont plus affectées par les erreurs sur les observations de sol (déterminations tactiles de texture par le test du boudin) que par les erreurs liées à la construction des fonctions d'estimations, seules susceptibles

[7] Lagacherie, P., Arrouays, D., Bourennane, H., Gomez, C., Martin, M., Saby, N.P.A., 2018. How far can the uncertainty on a Digital Soil Map be known?: A numerical experiment using pseudo values of clay content obtained from Vis-SWIR hyperspectral imagery. Geoderma.

d'être affectées par le volume d'observations utilisées. En d'autres termes, les erreurs de détermination de texture constituent un plancher indépassable qui limite les performances, quelle que soit le volume d'observation utilisé. Ce résultat peut se généraliser à différents volumes et type d'observations.

4.4. – Enseignements

L'expérimentation virtuelle d'utilisation de données d'observation de sol décrite ci-dessus a permis de montrer la faisabilité d'inclure de type d'observation non expert pour élaborer une carte de propriétés de sol par CSMS. Cependant, dans le cas de la propriété testée, la texture, l'incertitude affectant la mesure de la propriété de sol par un non expert s'est révélée être une limite importante. D'autres tests seraient à effectuer sur des propriétés mieux estimées. Ceci milite cependant pour un accompagnement des non experts par des experts, qui peuvent être des bénévoles formés au départ ou s'étant progressivement formés, afin d'atteindre une qualité d'observation de sol « experte ».

Les résultats obtenus dans cette expérimentation virtuelle restent cependant très partiels et doivent être considérés avec prudence, de nombreux points nécessitant d'être approfondis, en particulier :

- L'évaluation des performances des différentes fonctions d'estimation doit être approfondie en testant plusieurs échantillons de validation, et en étendant l'expérimentation avec des densités d'échantillonnage plus faibles, à même de révéler des niveaux de performance variés, des différences plus ou moins importantes selon les sources de données.
- Des objectifs plus réalistes de cartographie de propriété de sol, qu'une simple détermination de texture à deux modalités, devront être considérés. Ceci implique de poursuivre les tests d'incertitude de la mesure par des non experts, pour obtenir des références d'incertitude plus complètes, robustes, notamment des incertitudes sur des non experts mieux accompagnés.
- L'expérimentation virtuelle doit être généralisée à d'autres approches de CSMS qui pourraient montrer des résultats différents de ceux obtenus dans ce projet. Notamment de nouvelles approches récentes de CSMS apportant des progrès importants dans l'utilisation de données de sol incertaines[8] seraient à tester.
- Des expérimentations en vraie grandeur devront être engagées pour mieux apprécier les volumes, les distributions spatiales et les qualités d'observation qu'il est possible d'obtenir de non experts dans des conditions réelles de mise en œuvre, impliquant d'autres contraintes non considérées dans cette expérimentation virtuelle (exemple, contrainte d'échantillonnage).
- Une variété de contextes pédologiques présentant une large gamme de variabilités de propriétés de sol à cartographier devra aussi être considérée pour apprécier la faisabilité du déploiement d'une telle approche participative sur des territoires à enjeux.

[8] Wadoux, A.M.J., Padarian, J., Minasny, B., 2018. Multi-source data integration for soil mapping using deep learning. Soils.
Zare, S., Abtahi, A., Rashid, S., Shamsi, F., Lagacherie, P., 2021. Combining laboratory measurements and proximal soil sensing data in digital soil mapping approaches. Catena 207, 105702.

V – Enseignements et messages clés du projet Clés de Sol

Après cette première phase de mise en œuvre, les résultats de Clés de sols sont :

- Une mallette Clés de sol finalisée avec des protocoles ciblés sur les propriétés physico-chimiques des sols, pouvant être utiles en soi et dans d'autres projets participatifs sur les sols (par exemple, portant sur la biodiversité) ;
- Une co-construction des protocoles avec les structures relais ;
- Une évaluation des bénéfices et des limites liées à une approche participative ;
- Une mise en évidence de l'importance de structures intermédiaires entre les observateurs et la recherche, la nécessité d'un accompagnement plus grand des bénévoles, vu la complexité des sols et de leurs propriétés, la nécessité de donner du sens au travail des bénévoles ;
- La mise en ligne d'un portail internet.

Clés de sol est donc désormais un programme de recherche participative novateur dans sa co-conception et son co-pilotage, reconnu comme tel. Il traite d'un sujet non exploré dans un champ participatif qui, après 3 ans de réalisation, a produit des résultats encore partiels et à consolider. Il apporte néanmoins une amorce de réponse pour la société aux enjeux de préservation des sols. Un sentiment d'utilité des bénévoles impliqués a été mis en évidence. Une mallette Clés de sol pour s'impliquer et agir concrètement a été réalisée, incluant un argumentaire scientifique et un cadre juridique. **Cependant, Clés de sol porte sur un sujet qui reste ardu pour impliquer largement les citoyens**. Des liens avec d'autres programmes participatifs, notamment sur la biodiversité, sont à opérer. Quelques points peuvent être développés.

Relation équipe projet – animateurs – bénévoles. La gestion de la crise sanitaire à partir de mars 2020 a fortement affecté le déroulement du projet. Des échantillons n'ont pas pu être prélevés au bon moment et plusieurs mois ont ainsi été perdus. La dynamique du projet, pourtant bien engagée avec la formation et la campagne d'échantillonnage portée par les animateurs, en a été affectée au fil du temps : les moments d'échange entre animateurs et équipes pilotes, les moments de restitution et de discussion avec l'équipe projet-les animateurs-les bénévoles, sur les données, leur richesse et faiblesse n'ont pu être faits qu'en visioconférence. Par ailleurs, nous avons constaté un fort renouvellement des animateurs au sein des structures relai (plus de la moitié), ceci ne facilitant pas une capitalisation de la formation et la mise en place d'échanges continus. L'entretien de cette relation, équipe projet-animateurs-bénévoles, indispensable, n'a pas été aussi facile qu'imaginée, de manière plus générale et plus encore dans les conditions de la crise sanitaire, car elle demande à chaque étape, temps et engagement. Ce point avait été soulevé en début de projet et s'est trouvé bien confirmé, amplifié par les conditions spécifiques des 2 dernières années du projet.

L'intérêt pour le sol en tant qu'objet de science participative. **L'intérêt pour les propriétés innées du sol et pour la cartographie des sols, en tant que cible d'un projet de sciences participatives.** L'intérêt pour le sol est avéré, que ce soit de la part des structures locales que des bénévoles. Cependant l'angle sous lequel il est traité dans Clés de sol n'est ni évident pour les bénévoles, ni pour les animateurs. La formation (2 jours en octobre 2019) avait souligné le très bon retour des animateurs, à découvrir un parcours de découverte du sol, riche, varié. Cependant sa déclinaison vers des bénévoles non formés et sans doute moins motivés pose question. La thématique des propriétés « innées » est moins attractive que d'autres (biodiversité, vers de terre...), d'où l'importance plus encore de bien illustrer l'intérêt et la mise en relation de ces propriétés avec les enjeux sociétaux, et de cibler des contextes ou des acteurs où cet angle de vue du sol fait sens.

- **Développer une/des démarches qui font sens pour des bénévoles**. A titre d'exemple, l'animateur « agricole » souligne le fait de plus travailler à connaitre les caractéristiques des sols en lien avec des pratiques culturales innovantes (pratiques de conservation des sols, réduction du travail du sol…) telle que la structure du sol, la stabilité structurale ou la biodiversité des sols, et parallèlement mieux prendre en compte la connaissance des sols qu'ont déjà les agriculteurs qui disposent en général d'analyses de sol sur les propriétés intrinsèques. Les propriétés identifiées, en tant que telle, n'amènent par exemple pas suffisamment d'intérêt pour les agriculteurs. Autre exemple, l'artificialisation des sols, dans un projet d'urbanisation. A titre d'exemple, les propriétés de Clés de sol pourraient être utilisées dans un projet d'urbanisation en veillant à préserver les sols à forte teneur en matière organique (couleur), profond (profondeur), forte réserve en eau (texture et profondeur).
- **Appuyer les associations** au développement de ces démarches car l'angle pris par le projet Clés de sol n'est pas autoporteur, et il y a besoin d'une structure qui va chercher les relais, que ce soit des associations ou directement des bénévoles avec une problématique accrocheuse, ceci tout au long du projet.

Des protocoles encore trop compliqués dans une première phase. La mise au point des protocoles a fait l'objet d'un important travail de simplification et d'explication pédagogique, avec des boucles de test, de relecture, d'accompagnement par des vidéos... Force est de constater qu'ils apparaissent encore trop complexes, notamment quand ils sont déployés par des bénévoles, même accompagnés d'un animateur.

- L'idée pourrait être d'avoir des protocoles à deux niveaux, l'un d'amorçage avec des approches très simples, l'autre de déploiement, avec les approches proposées actuellement.
- La formation tout au long du projet doit se développer sous une forme ou une autre (présentiel, MOOC...). Car il y a une difficulté à accéder seul aux protocoles. En particulier, un accompagnement de groupes de citoyens en début de prospection par un expert pourrait permettre d'améliorer la prise en main des protocoles et, ce faisant, la qualité des résultats.
- Enfin, les formes de restitution des données devraient faire encore l'objet d'une réflexion collective.

Le cout du matériel ou l'accompagnement à s'équiper peut être un frein pour certaines structures.

VI – Perspectives

Des perspectives peuvent être dressées à plusieurs niveaux : 1) celui de tirer les enseignements sur les travaux réalisés ; 2) celui de poursuivre le projet tel que nous l'avions défini ; 3) celui de tirer parti des dynamiques actuelles sur les approches de sciences participatives sur le sol.

Le premier, celui de répondre aux enseignements sur les travaux réalisés :

- Développer des « produits » qui valorise bien les données acquises, pour les animateurs et bénévoles qui s'y engagent ET pour les scientifiques. La définition de « produits » pour les bénévoles et animateurs qui s'y engagent doit être développée, et ce développement dépendra des publics et des contextes. Comment utiliser et valoriser la donnée transmise, comment faire démonstration que la donnée leur serve. Un sentiment d'utilité vis-à-vis de la recherche est importante pour les bénévoles, ce qui implique aussi un retour de la recherche vers eux. Un volet de formation, d'acquisition de connaissance, en lien avec une utilité pour la société ou pour les personnes est également important.

- Faire le lien entre les propriétés étudiées, et l'utilité et l'usage des résultats pour répondre à une question de société. Par exemple : trouver un intérêt personnel en lien avec un métier/un loisir (pour un agriculteur/un jardinier : mieux appréhender les sols de son champ/de son jardin) ; rattacher Clés de Sol à des enjeux de territoire comme l'artificialisation des sols, l'alimentation...

La seconde perspective est le déploiement du projet Clés de sol tel qu'il avait été défini, avec un projet de type Clés de sol phase 2 qui pourrait comprendre le contenu suivant :

- Un déploiement aux niveaux national et territorial, une réflexion sur le modèle socio-économique de Clés de sol à moyen terme ;
- Un travail sur la capitalisation des données, notamment avec la création d'une application mobile, dont une chaine de traitements et de restitution standard des données ;
- Une communication via un site internet à destination des personnes destinées à contribuer (explication des données, retour aux contributeurs...). En effet, le portail web (www6.inrae.fr/clesdesol) créé en 2021, grâce à la mobilisation de ressources informatiques d'INRAE et des partenaires pour le contenu du site, est destiné à faire connaitre le projet à des partenaires, des structures associatives. Un travail similaire doit être fait pour s'adresser aux bénévoles. Clés de sol dispose néanmoins déjà d'une plaquette de présentation à destination de bénévoles futurs contributeurs et d'un visuel comme identité graphique (réalisés en 2021).

La troisième perspective est née de l'émergence de nombreux projets de sciences participatives sur les sols. Il faut analyser en quoi Clés de sol peut se nourrir de l'expérience d'autres projets, notamment pour développer les actions prévues dans la seconde phase, et en quoi Clés de sol peut compléter des projets sur d'autres angles du sol. Deux sont identifiés : travailler avec les projets qui portent sur la biodiversité, pour compléter leur offre et vice versa ; travailler d'une nouvelle manière sur l'identification des sols, non pas à partir de la caractérisation de propriétés des sols prédéfinies, mais à partir d'une nomenclature de sol co-construite avec les acteurs dans le cadre d'une problématique donnée. C'est ce que fait le projet PELUDO_AAC, coordonné par P. Lagacherie, membre du projet Clés de sol, en développant une méthode participative d'étude pédologique sur les aires d'alimentation de captages d'eau potable. Une solution serait de proposer les deux voies, selon le contexte de l'étude.

INRAE, avec l'appui financier de l'Ademe et de l'OFB, a organisé le 24 novembre 2021, à la Cité des sciences et de l'industrie de La Villette, un colloque sur les programmes participatifs sur les sols. Une centaine de personnes était présente, et une vingtaine de projets ont été inventoriés en France. Une grande partie de l'équipe de Clés de sol était impliquée dans l'organisation (Chantal Gascuel, INRAE) ou dans les intervenants (Ludovic Serin, Union nationale des CPIE ; Joëlle Sauter, Chambre régionale d'agriculture Grand-Est ; Blandine Lemercier (Institut Agro site de Rennes), Pascale Frey-Klett (Tous chercheurs), Philippe Lagacherie (INRAE, UMR LISAH). Clés de sol a fait partie des 5 projets présentés à l'auditoire par Blandine Lemercier et Ludovic Serin. Cette dynamique nationale dans laquelle Clés de Sol occupe une place importante appui cette troisième perspective.

Références

Catherine Jondreville, Blandine Lemercier, Caroline Joigneau-Guesnon, Rachel Louiset, Chantal Gascuel, Christophe Roturier. 2018. Clés de sol : un projet de sciences participatives pour caractériser les sols et leurs fonctions, 42 pp.

Philippe, L., Bertrand, L., Patrick, L.G., Laurent, R., 2021. Une démarche de co-construction de la connaissance pédologique par les agriculteurs et les pédologues. L'exemple de l'Aire d'Alimentation de Captage de la Gimone (82). Agron. Environ. Société 11, 1–12.

https://www.inrae.fr/actualites/sciences-participatives-au-service-sols

https://www.afes.fr/actions/recherches-participatives/porteurs-de-projets-recherche-participative/

https://www.afes.fr/actions/recherches-participatives/le-colloque-annuel/

https://www.inrae.fr/actualites/aux-sols-citoyens

ANNEXES