

PRÉVIBEST : PRÉVENIR LES RISQUES DE TASSEMENT EN SYSTÈMES BETTERAVIERS



Damian MARTIN (AGT), Thomas LEBORGNE (ITB), Pierre DUL (ITB), Rémy DUVAL (ITB), Annie DUPARQUE (AGT), Vincent TOMIS (AGT), Cyril BLONDIN (Tereos), Francis BAZELAIRE (Tereos), Damien ANDRIEU (Tereos), Guillaume BRISSET (ITB)

Avec l'appui scientifique de : Mathieu LAMANDÉ (Univ. Aarhus), Hubert BOIZARD (Retraité INRAE)

1. Qu'est-ce que le tassement des sols ?

1.1 Le tassement des sols : définition, processus, facteurs et conséquences

Le tassement est la résultante de la perte d'un équilibre entre une contrainte exercée sur le sol et sa propre résistance (figure 1). Lorsque la contrainte dépasse la résistance, le sol subit une déformation interne et une réduction de porosité ce qui caractérisent un tassement ⁽¹⁾.

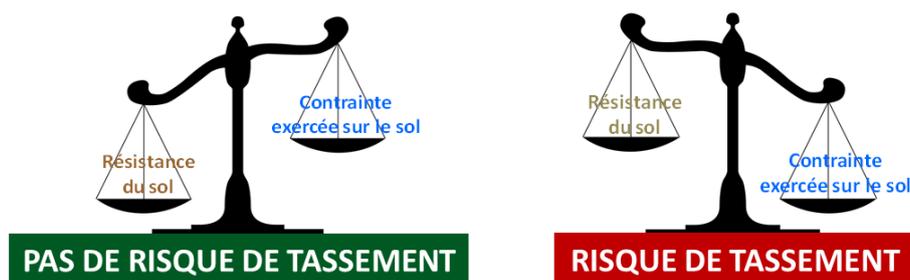


Figure 1 : Schématisation du tassement

Le risque de tassement est limité lorsque la résistance du sol est élevée. Cette résistance est liée à différents facteurs, le principal étant l'humidité du sol. Plus celle-ci sera faible, plus le sol est en capacité de résister à des charges lourdes sans se déformer. En conditions humides, un faible taux d'argile, une masse volumique élevée et un taux de matière organique important contribuent également à une résistance du sol élevée.

A l'inverse, le risque de tassement augmente avec la contrainte de compression, principalement déterminée par une charge à l'essieu élevée. La largeur des pneumatiques, leur volume d'air et leur pression de gonflage tendent à diminuer cette contrainte, du moins dans les horizons superficiels.

Il est important de distinguer le tassement superficiel et le tassement en profondeur. Dans les premiers horizons, le sol est principalement déformé en fonction de la surface de contact entre la machine et le sol (largeur des pneumatiques). Les déformations sont très visibles, par la formation d'ornières en surface. Ces tassements ont lieu dans les horizons travaillés et peuvent être récupérables mécaniquement avec les outils de travail du sol. Les tassements profonds sont causés par des charges à l'essieu importantes et concernent les horizons plus profonds (notamment l'horizon pédologique, c'est-à-dire l'horizon qui n'est et n'a jamais été travaillé mécaniquement). Ces derniers ne sont pas contrôlés par le choix de pneumatiques larges. Ils sont très préjudiciables étant très persistants dans le temps et non récupérables mécaniquement du fait de leurs profondeurs. Seule la régénération naturelle du sol par

l'activité biologique et le climat permettra une régénération du tassement lente (entre 4 et 7 ans en moyenne en fonction du type de sol, Boizard et al., 2009⁽²⁾).

Le compactage du sol en surface et en profondeur a des conséquences agronomiques. La productivité des cultures se trouve impactée en raison des difficultés d'enracinement et d'une diminution d'accès aux nutriments. Les fonctions du sol sont affectées, qu'il s'agisse de la circulation de l'air et de l'eau ou de l'activité biologique, conduisant à des effets négatifs sur le potentiel de rendement de la culture en place. Enfin, d'un point de vue environnemental, le tassement favorise les émissions de protoxyde d'azote (N₂O) qui est un puissant gaz à effet de serre.

1.2. Outil permettant d'évaluer le risque de tassement des sols : TERRANIMO®

Terranimo® est un outil en ligne⁽³⁾ de prédiction du risque de tassement par les engins agricoles (disponible en accès libre). Deux versions ont été développées par deux équipes internationales de recherche :

- Une version Suisse, développée par Agroscope Zürich
- Une version internationale, développée par une équipe de recherche danoise de l'université de Aarhus, utilisée actuellement plutôt pour des activités de R&D. La version retenue dans le cadre de cette étude sera cette dernière.

Le logiciel Terranimo® repose sur les principes exposés en introduction : la pression au sol exercée par les engins agricoles est compensée par la résistance du sol. Lorsque celle-ci est supérieure à la contrainte exercée par les engins, il n'y a pas de déformations persistantes du sol. A l'inverse, si la résistance du sol est inférieure à la contrainte exercée, les déformations sont persistantes et donc dommageables.

Il est compliqué d'estimer la résistance du sol et la contrainte exercée sur le sol par les engins. Terranimo® permet, à partir d'un ensemble de paramètres simples et accessibles, d'estimer le risque de tassement. Pour déterminer la résistance du sol, la texture du sol (principalement la teneur en argile) et l'humidité du sol sont à renseigner. Pour faciliter la lecture du diagnostic de risque, le logiciel définit trois niveaux de risque de tassement. Pour déterminer la contrainte exercée au sol par les engins, Terranimo® a besoin de la charge à la roue, des caractéristiques des pneumatiques et des pressions de gonflage des pneumatiques. Terranimo® livre trois principaux résultats :

- Les caractéristiques de l'aire de contact entre le sol et le pneu : sa surface, sa longueur, sa largeur mais aussi les contraintes exercées.
- Un diagramme de propagation des contraintes sous les roues (figure 2).
- Un graphique de synthèse du risque de tassement en profondeur : il montre le croisement entre les niveaux de résistance du sol, qui déterminent le risque de tassement et les contraintes exercées sous les roues.

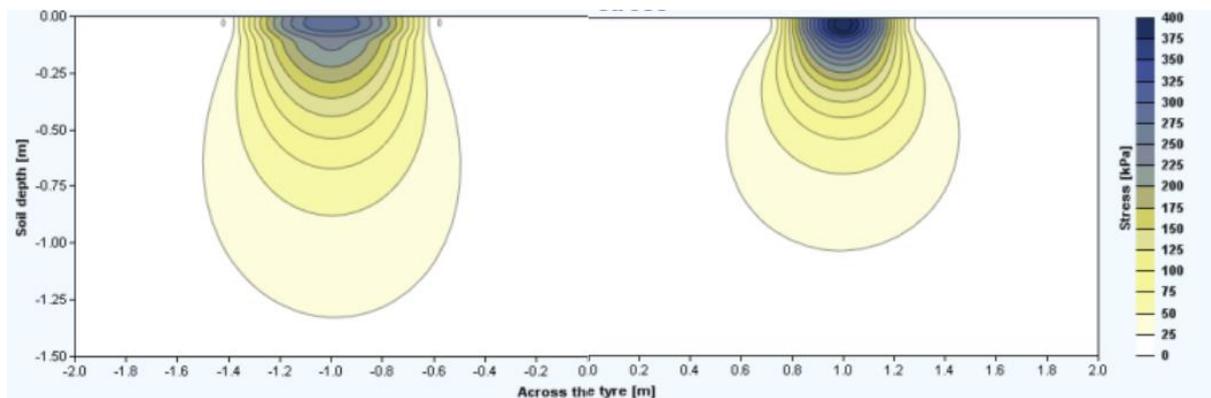


Figure 2 : exemple de sortie du logiciel Terranimo® concernant la propagation des contraintes sous les roues

Terranimo® est un outil d'aide à la décision destiné à un public expert. Le projet Prévibest le rend indirectement accessible à un public plus large, ici aux acteurs de la filière betterave qui pourront bénéficier d'un diagnostic de risque de tassement lors d'un chantier de récolte.

2. Contexte de la récolte en betterave

2.1. Des machines plus lourdes récoltant souvent en conditions dégradées

Au cours des dernières années, le progrès technologique des machines de récolte de betteraves a été important. Elles peuvent désormais réaliser en un passage l'intégralité du chantier de récolte de la culture (effeuillage, scalpage, arrachage, déterrage et stockage). Ces machines, aussi appelée « intégrales de récolte », ont permis de gagner en efficacité et de grandement simplifier l'organisation des récoltes (moins de main d'œuvre nécessaire). En effet, l'organisation des chantiers de récolte sans ce type de machine que ce soit en chantier « décomposé » ou avec « automotrice » nécessite la présence de plusieurs personnes pour la conduite des bennes du fait d'une capacité de stockage faible voire nulle pour ces typologies de chantier de récolte. C'est dans ce contexte que les intégrales se sont démocratisées très rapidement dans les plaines betteravières en remplaçant progressivement les matériels de récolte de type automotrice ou chantiers décomposés, même si ces derniers sont toujours proposés par certains constructeurs (voir figure 3).



Figure 3 : Illustration d'une intégrale de récolte (à gauche) et d'un chantier décomposé (à droite)

Ces machines de récolte disposent d'équipements lourds (bâti arracheur, effeuilleuse) et surtout de trémies de stockage de grande capacité (45 m³ pour les plus grands modèles) permettant le stockage des betteraves pendant la récolte. Ces caractéristiques techniques rendent les intégrales de récolte très lourdes, avec un poids global de la machine avoisinant les 60t à pleine charge. Cette masse est transmise via les essieux de la machine directement au sol, engendrant des risques élevés de compactage des sols.

Les betteraves sont arrachées à l'automne. A cette période de l'année, il est fréquent d'avoir de mauvaises conditions pédoclimatiques avec une humidité du sol élevée augmentant les risques de tassement des sols.

2.2. Un besoin de sensibiliser les professionnels de la filière au risque de tassement en profondeur

Avec une charge à l'essieu importante (>20t) et des conditions de récolte en sols humides, les intégrales de récolte sont un facteur de risque très important pour les tassements des sols, et particulièrement les tassements en profondeur causés par une charge importante à l'essieu (voir projet Sol-D'Phy⁽⁴⁾). Ces phénomènes sont assez nouveaux et méconnus des agriculteurs betteraviers, qui sont attentifs aux déformations en surface (ornières creusées par les pneumatiques) mais peu conscients de ce qui peut se passer en profondeur. En effet, les intégrales qui circulent très souvent en crabe (essieux avant et arrière décalés) et avec des pneumatiques larges, rendant la couche superficielle de la parcelle vierge de toute déformation visible (comme le montre l'image ci-dessous, figure 4) laissant croire à tort que le tassement est limité alors que le compactage peut être important en profondeur. En réalité, 100% de la surface de la parcelle est déformée bien qu'aucune ornière ne soit observable.



(Source : Photo BETTERAVENIR 2023)

Figure 4 : Comparaison visuelle, en conditions humides, d'un chantier décomposé (générant des ornières en surface) et d'une intégrale (surface lisse de la parcelle)

Face à ces différents enjeux, il apparaît nécessaire de fournir aux agriculteurs et aux professionnels de la filière, un outil d'aide au raisonnement qui permette d'améliorer les décisions stratégiques à prendre lors de la récolte de betteraves pour limiter le tassement en profondeur. Plus largement, l'enjeu est de structurer un conseil qui n'est que peu développé actuellement par les acteurs du développement et de la filière.

3. Le projet 'PRÉVIBEST'

3.1. Présentation générale du projet

Lauréat d'un appel à projet FranceAgriMer en 2019, le projet 'PRÉVIBEST'⁽⁵⁾ a été conçu par trois partenaires : l'Institut Technique de la Betterave, Agro-Transfert RT et Tereos. Conduit sur une durée de 3 ans entre 2020 et 2023, ce projet, piloté par l'ITB, porte sur la sensibilisation aux tassements des sols, ses conséquences, ainsi que leur anticipation lors des récoltes de betteraves. L'objectif final est d'aboutir à un outil d'aide au raisonnement qui accompagnera les acteurs de la filière dans l'appréhension des risques de tassements, en priorité les tassements profonds, potentiellement générés par les récoltes de betteraves, et leur prise en compte dans l'organisation des chantiers. Ce projet est construit sur deux piliers :

- Un volet 'Expérimentation terrain' : deux expérimentations de longue durée conduites sur les exploitations Tereos de Boiry-Sainte-Rictrude (62) et de Chevrolières (60), comparent un système de culture cumulant des tassements fréquents et un système de culture ménageant un temps de régénération après un tassement initial. Les différentes mesures effectuées serviront de références chiffrées exploitées dans l'élaboration de l'outil qui intégrera une dimension système dans le diagnostic et le conseil.
- Un volet 'Construction de l'outil' : besoins des utilisateurs, définition et description de scénarios de récolte, utilisation de l'outil de simulation de tassement de sols superficiels et profonds Terranimo®, évolution des tassements en fonction de différentes règles de décision. L'objectif est de proposer un outil simple au service de tous les acteurs de la filière permettant d'analyser tous les chantiers de récolte et de proposer des pistes d'améliorations vis-à-vis du tassement profond.

Cet outil se veut tactique, pour des décisions à court terme, voire moyen-long terme pour la durée de campagne de récolte. Pour des décisions stratégiques s'appuyant sur les jours disponibles de récolte, l'outil J-DISTAS⁽⁶⁾ porté par Arvalis est déjà en cours de développement.

3.2. Répondre aux attentes de la filière

Afin de répondre au mieux aux attentes de la filière, un travail d'enquête auprès des différents acteurs impliqués dans la campagne d'arrachage des betteraves a été effectué. Les besoins en outil d'aide à la décision par acteurs sont résumés ci-dessous :

- Agriculteurs et conseillers : ces acteurs attendent un outil facile d'accès, pour pouvoir décider d'intervenir ou de reporter un chantier de récolte, ou adapter si nécessaire le chantier (machines, réduction de charge, circulation dans la parcelle...) pour limiter les risques de tassement profond sur leurs parcelles. Certains leviers mériteront être proposés, même s'ils ne sont envisageables que pour une future campagne. Le diagnostic et le conseil doivent tenir compte de l'hétérogénéité des parcelles (sols).
- ETA et CUMA : mieux identifier l'impact de leurs chantiers en termes de risque de tassement profond, orienter le renouvellement du parc matériel. Dans certains cas, proposer des adaptations du chantier de récolte à l'agriculteur.
- Sucreries : sans amener directement un conseil, la suggestion est de proposer un aperçu global de la situation dans les secteurs d'approvisionnement pour chaque usine. Sur cette base, il s'agira d'adapter, quand c'est possible et avec une concertation interne, les dates d'enlèvement des dépôts de betterave selon les petites régions naturelles afin d'optimiser l'approvisionnement de l'usine en betteraves en cours de campagne tout veillant à la préservation des sols vis-à-vis des risques de tassement.

3.3. Typologie des scénarios de récolte

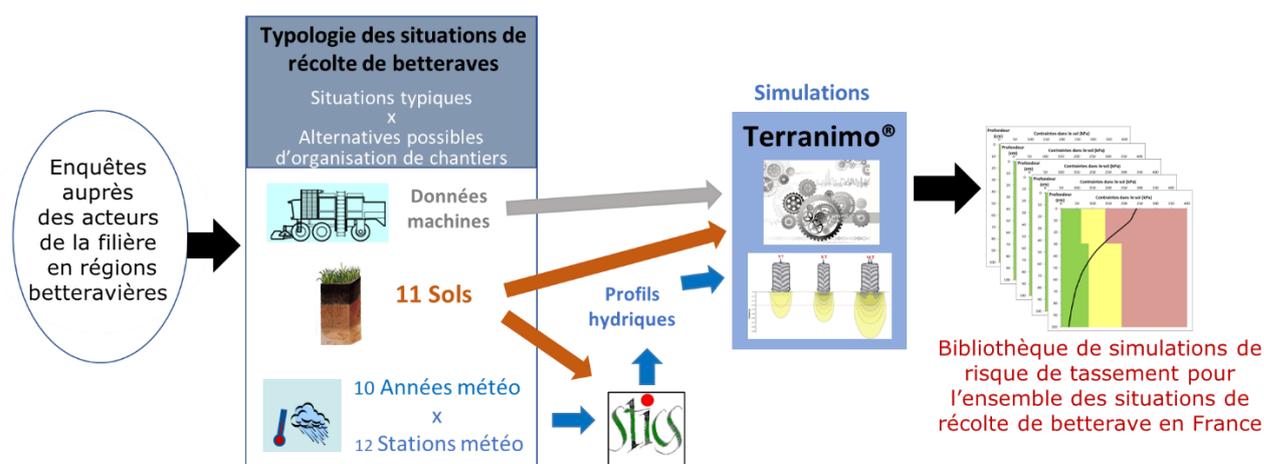


Figure 5 : Construction de la bibliothèque de simulations, ressource essentielle de l'outil Prévibest

Les échanges avec les personnes les plus impliquées sur le terrain, responsables de secteurs Tereos, ingénieurs régionaux ITB et service agronomique Tereos, ont permis de construire un ensemble de situations types, scénarios de chantiers de récolte dans différents contextes pédoclimatiques représentatifs de l'ensemble de la sole betteravière.

Pour ce faire, une base de données de 11 sols a été construite, renseignant sur la texture, la structure et le taux de matière organique (figure 5). Ces données pédologiques ont été combinées à des données de 12 stations météorologiques représentant la sole betteravière française, sur 10 années, pour simuler, avec les logiciels Stics, puis avec le logiciel Terranimo®, une large gamme de profils hydriques possibles et le risque de tassement associé. L'équipe de recherche danoise de l'université de Aarhus a

fourni toutes les données d'entrée de Terranimo® relatives aux machines et équipements impliquées dans les récoltes de betterave.

Cette bibliothèque de simulations du risque de tassement est une ressource pour l'outil Prévibest, avec plusieurs finalités :

- Donner une vision représentative des situations rencontrées, et de l'effet plus ou moins probant des leviers envisagés en cas de risque de tassement.
- Servir de base de données dans laquelle l'outil ira chercher un résultat de simulation de risque correspondant à la situation décrite par l'utilisateur. Il s'agit d'une option, des solutions alternatives sont envisagées.
- Donner à l'utilisateur une vue globale de son contexte pédoclimatique, à l'échelle de la campagne de récolte, pouvant alimenter sa réflexion et envisager des solutions à moyen-long terme.

3.4. Acquisition de références terrain

La volonté des partenaires dans la construction du conseil est d'intégrer les conséquences sur les risques du tassement en profondeur non pas à l'échelle annuelle mais à l'échelle du système de culture. Ainsi, afin d'étayer l'outil avec des données chiffrées de terrain, deux sites d'expérimentation de longue durée ont été mis en place. Sur ces deux essais, localisés en région betteravière (Boiry-Sainte-Rictrude (62), et Chevrières (60)), sont comparés deux systèmes de culture différents : un système cumulatif avec des tassements profonds fréquents et un système régénératif avec un tassement profond initial puis un temps de régénération sans tassement. Le détail des cultures mises en place dans ces systèmes de culture est présenté sur le schéma ci-dessous (figure 6).

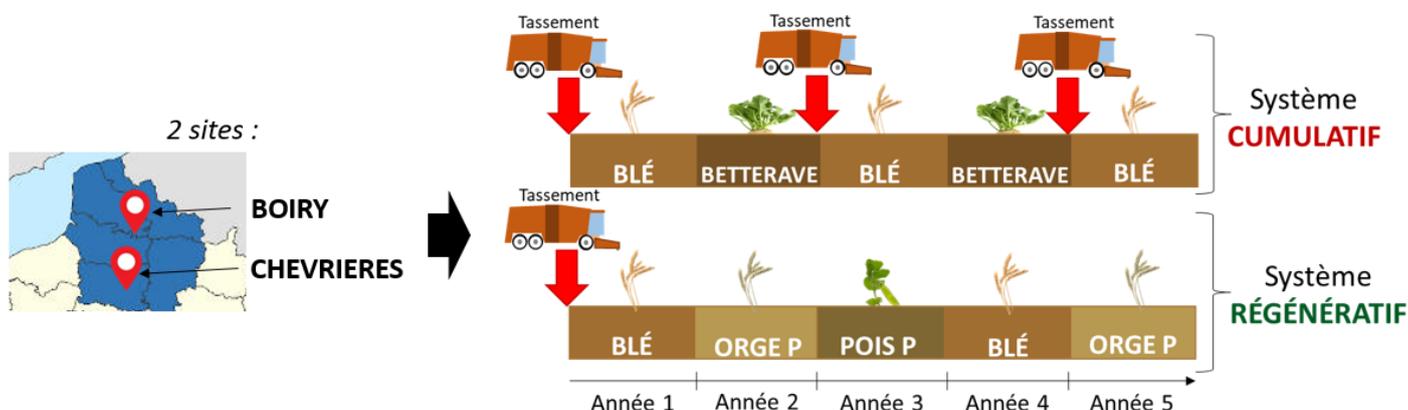


Figure 6 : Détail des cultures mises en place dans le système de Boiry-Sainte-Rictrude (62)

Chaque année sur ces deux sites d'expérimentation, des mesures et analyses de l'état structural du sol ont été réalisées (pénétronomie, densité apparente, profils culturaux, etc.) pour chaque système. Les composantes de rendement (rendement, épi/m², etc.) ont été également mesurées pour chaque culture.

Une synthèse pluriannuelle comparant les deux systèmes de culture va permettre de mettre en avant des données chiffrées sur les conséquences agronomiques d'un tassement en profondeur, le temps de régénération d'un sol, etc. Ces références viendront s'ajouter aux références bibliographiques intégrées dans le conseil fourni par l'outil.

3.5. Fonctionnement de l'outil

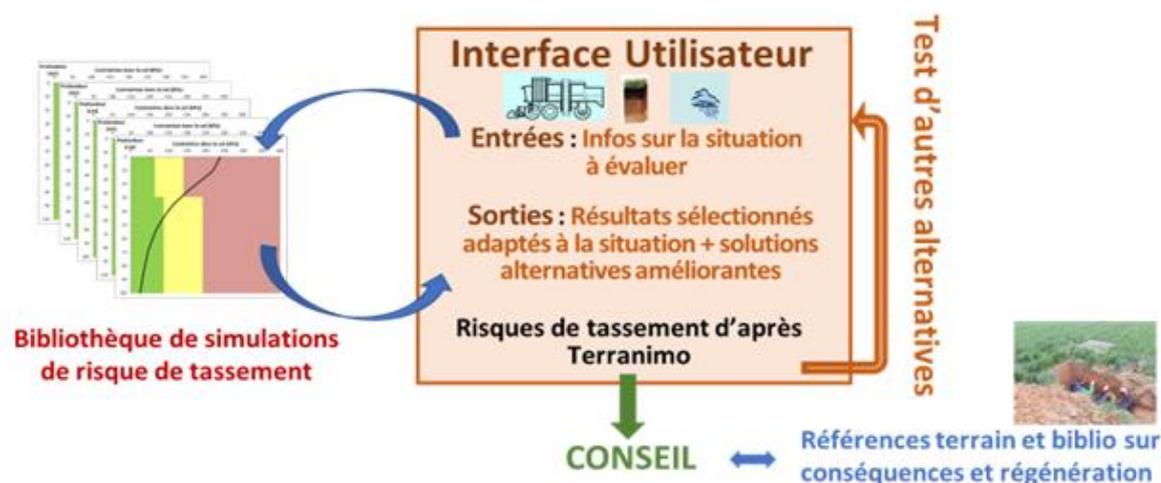


Figure 7 : Schéma de fonctionnement du futur outil Prévibest

Afin de connaître le risque de tassement que pourrait causer son chantier de récolte de betterave, l'utilisateur devra fournir à l'outil quelques renseignements, tels que des caractéristiques des matériels (poids à l'essieu, dimension et pression des pneumatiques), la typologie de son sol (texture, structure) et l'humidité du sol (figure 7). Cette dernière est abordée de façon plus précise dans la partie suivante. Ces données permettront de chercher la correspondance la plus exacte possible avec un profil de risque de tassement simulé au préalable. L'outil présentera alors ce risque à l'utilisateur, avec des informations sur les possibles conséquences de ce tassement sur les cultures suivantes, et la possibilité de régénération naturelle en profondeur. Ces deux derniers points seront appuyés par un travail de veille bibliographique, et par les expérimentations agronomiques conduites lors du projet (cf. partie 3.4).

L'outil permettra de revenir sur des choix spécifiques de caractéristiques entrées initialement, afin d'améliorer le profil de risque de tassement. Ces nouvelles caractéristiques sont des leviers proposés à l'utilisateur, correspondant à des alternatives de chantiers qu'il est possible de mettre en œuvre.

3.6. Estimer l'humidité du sol

L'humidité étant un facteur déterminant du tassement des sols et une variable d'entrée de l'interface utilisateur, un travail conséquent a été mené sur l'estimation de l'humidité au champ. En effet, il est facile de paramétrer sa machine, d'indiquer son type de sol, mais qu'en est-il pour l'estimation de l'humidité ? De ce fait, différentes pistes ont été étudiées au cours du projet.

3.6.1. Travail sur des variables météo

Une première méthode envisagée est d'utiliser un indicateur climatique simple pour identifier, dans la base de données de simulation décrite plus haut, la même situation de profil hydrique que celle de l'utilisateur le jour j , donc le même niveau de risque de tassement (méthode d'appariement d'un jour j avec un jour présent dans la base présentant la même valeur de l'indicateur). Cette méthode, testée avec différents indicateurs climatiques basés sur les caractéristiques P, ETP combinées sur plusieurs périodes précédentes le jour j s'avère aléatoire et insuffisamment précise.

3.6.2. Réseau de mesures simplifiées : mesures terrain pour s'approcher de l'humidité réelle

Un moyen d'obtenir une humidité fiable est de la mesurer directement au champ. Un réseau de mesure permettrait de suivre en temps quasi réel la situation hydrique des parcelles concernées. Étant donné que Terranimo® a besoin du potentiel matriciel pour fonctionner, il serait plus intéressant d'acquérir ce type de donnée directement par mesure, sans passer par une valeur d'humidité volumique.

La dynamique de l'eau dans le sol étant directement liée à la texture du sol et aux précipitations, il convient d'avoir un point de mesure dans chaque couple type de sol / type de météo (figure 8). Pour établir ce réseau, la première étape sera de définir une cartographie des principaux types de sol et des principaux microclimats. Les mesures réalisées en continu pourraient utiliser la base de données de simulations pour rechercher le risque de compactage dans la situation du profil, ou alimenter directement l'outil Terranimo.

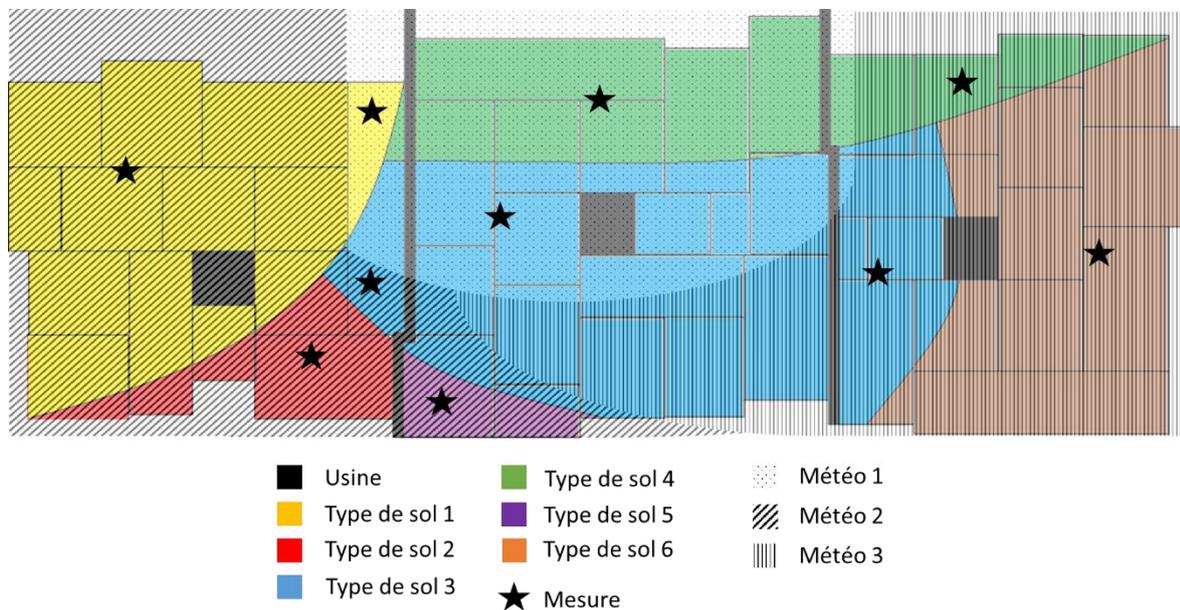


Figure 8 : mise place d'un réseau de mesure de l'humidité des sols en région betteravière

4. Conclusion et perspectives

La plupart des chantiers de récolte de betteraves sont désormais réalisés par une intégrale de récolte, et la tendance n'est à priori pas prête d'évoluer. Ces machines offrant confort et efficacité de travail sont capable d'arracher même dans des conditions dégradées permettant de fournir des betteraves aux sucreries sur toute la campagne d'approvisionnement. Leurs charges à l'essieu et les conditions de récolte sont néanmoins des facteurs très à risque vis-à-vis des tassements en profondeur.

Dans ce contexte, le projet 'PRÉVIBEST' s'est articulé autour de la construction d'un outil d'aide à destination de tous les acteurs de la filière afin de mieux appréhender ce risque et de l'intégrer dans l'organisation du chantier de récolte. Le tassement des sols en profondeur, bien que très persistante, n'est pas une fatalité pour les agriculteurs. De nombreux leviers plus ou moins facilement mobilisables existent pour réduire la profondeur du tassement et réaliser un chantier d'arrachage sans risque ou en le réduisant sensiblement. C'est dans cet esprit que l'outil d'aide au raisonnement délivrera des éléments de connaissance et des conseils aux différents acteurs de la filière. Ce prototype devra être disponible courant 2024.

5. Liens et bibliographie

Bibliographie :

- (1) Schjønning, P., Lamandé, M., Créatin, V., Nielsen, J.Å., 2017. Upper subsoil pore characteristics and functions as influenced by field traffic and freeze-thaw and dry-wet treatments. *Soil Res.* 55, 234–244.
- (2) H. Boizard, Yvan Capowiez, Joël Léonard, Stéphane Cadoux, S. Lheureux, Isabelle Cousin, Jean Roger-Estrade, Guy Richard, Soil structure regeneration after compaction in a loamy soil in Northern France: The influence of climate and earthworms, 2009

Liens Internet :

- (3) Logiciel Terranimo : <https://www.terranimodk/>
- (4) Plus d'informations sur les projets Sol-D'Phy 1 et 2 : <http://www.agro-transfert-rt.org/projets/sol-dphy/>
- (5) Plus d'informations sur le projet Prévibest : <https://www.itbfr.org/collaborations/previbest/>
- (6) Plus d'informations sur le projet J-DISTAS : <https://www.arvalis.fr/recherche-innovation/nos-travaux-de-recherche/j-distas>