

Les solutions de cartographie des propriétés physico-chimiques du sol

Fiche n° 3 - Projet DuratechFarm

Quand une hétérogénéité des rendements a été identifiée et quantifiée au sein d'une parcelle (voir Fiche n° 2), il est pertinent de chercher à en comprendre l'origine.

Pour cela, les techniques de cartographie des propriétés physico-chimiques (TCPC) du sol peuvent être d'une grande utilité. Afin d'aider les agriculteurs à choisir une méthode adaptée de cartographie des sols, les équipes du CRA-W ont testé deux solutions de TCPC dans le cadre du projet.

Le projet DuratechFarm vise l'intégration de l'agriculture de précision au sein d'une exploitation conventionnelle et bio afin d'en évaluer la plus-value. Les recherches ont été menées au sein de la Ferme du Plein Air.



Avec le soutien de :

Les solutions de cartographie du sol, qu'est-ce que c'est ?

Les TCPC permettent de quantifier, à l'échelle intra-parcellaire, des paramètres tels que le pH, la teneur en argile ou le taux de matière organique. Elles s'appuient sur des capteurs embarqués, qui analysent le sol en temps réel lors du passage d'un véhicule (tracteur, quad, pick-up, etc.) sur les parcelles.

Les résultats sont des cartes obtenues après interpolation spatiale de données ponctuelles, enregistrées à intervalles réguliers par les capteurs embarqués. Les TCPC présentent l'avantage de couvrir l'ensemble de la surface de la parcelle, contrairement aux analyses de laboratoire classiques, qui ne fournissent que des données ponctuelles.

Pour garantir leur fiabilité, ces cartes sont ensuite étalonnées et calibrées à l'aide d'échantillons de sol prélevés le jour du passage du dispositif, et que les prestataires de TCPC font analyser en laboratoire.

La solution Veris MSP3 (Vantage Agrometius)

Cette solution permet de recueillir quatre indicateurs sur les propriétés physico-chimiques du sol :

- **La conductivité électrique du sol**, mesurée à deux profondeurs (0-30 cm et 0-90 cm). Il s'agit d'un dispositif équipé de six disques électrodes-coutres de 43 cm de diamètre insérés dans le sol. Deux disques émettent un courant continu de 10 à 15 volts, tandis que quatre disques enregistrent le signal reçu (deux pour chaque profondeur). La conductivité électrique du sol est mesurée entre 253 et 634 fois par hectare dans les essais du CRA-W (en fonction de la vitesse d'avancement du véhicule).
- **La teneur en matière organique** est mesurée à l'aide d'un capteur proche infrarouge à double longueur d'onde. La teneur en matière organique du sol est mesurée entre 253 et 634 fois par hectare.
- **La mesure du pH du sol** est réalisée grâce à deux électrodes en verre sensibles aux ions hydrogène sur des échantillons de sol prélevés automatiquement par le dispositif. Le pH du sol est mesuré entre 27 et 60 fois par hectare.

Le pourcentage d'argile et la capacité d'échange cationique ne sont pas disponibles pour les parcelles situées en Wallonie.

Les données du VerisMSP3 ont été étalonnées grâce à des analyses de sol réalisées par le Service Pédologique de Belgique (BDB - SPB).



Figure 1 : Photo du Véris MSP3 et schémas de chacun des 3 capteurs le composant (Vantage Agrometius, 2025).

Une fois les données traitées par le prestataire de service, les résultats suivants sont transmis au client :

- **Le rapport d'analyse de laboratoire** pour chaque prélèvement de sol utilisé pour l'étalonnage de la solution, accompagné de recommandations sur la gestion du carbone organique et le chaulage.
- **Deux cartes de modulation de doses** (chaulage et apport de matière organique), fournies dans un format compatible avec l'équipement agricoles du client.
- D'éventuelles **préconisations** complémentaires, selon les besoins spécifiques de l'exploitation.

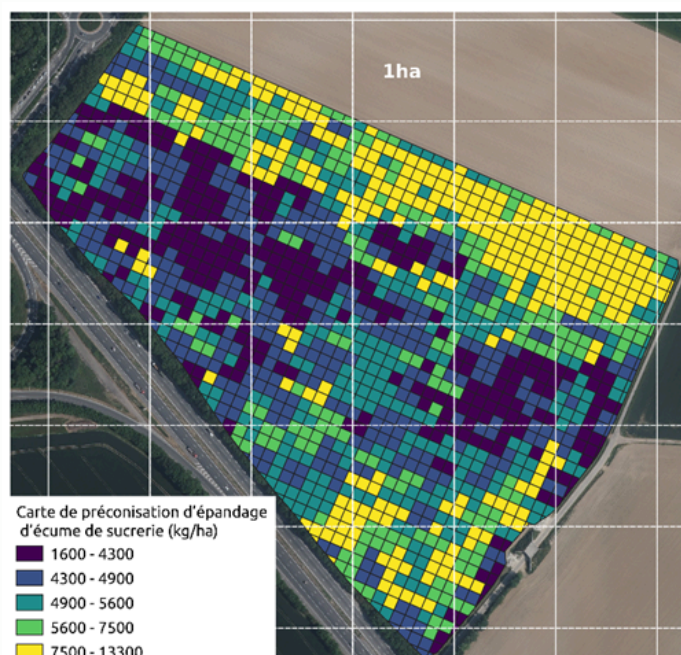


Figure 2 : Exemple de carte de préconisation fournie par la solution Veris MSP3 (Vantage Agrometius, 2024).

Les solutions de cartographie des propriétés physico-chimiques du sol

La solution INTERRA Scan (Syngenta)

Cette solution met en œuvre une technologie de détection passive (rayons gamma) et mesure la radioactivité naturelle émise par 4 isotopes présents dans le sol : le césium, l'uranium, le potassium et le thorium. L'appareil de mesure est situé à 60 cm du sol.



Figure 3 : Photo de l'INTERRA Scan accroché derrière un pick-up (CRA-W, 2024).

Cette méthode n'est pas destructrice, mais il est malgré tout nécessaire que le stade de la culture puisse permettre le passage du véhicule. La solution permet de cartographier 27 paramètres du sol, incluant le pH, la texture, la matière et le carbone organiques, la capacité d'échange cationique, la teneur en eau disponible, et divers éléments chimiques (B, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, P, S). La radioactivité du sol est mesurée entre 796 et 853 fois par hectare dans les essais du CRA-W. Les données INTERRA Scan ont été étalonnées grâce à des analyses de sol réalisées par Inagro. Une fois les données traitées par le prestataire de service, les cartes sont disponibles sur une plateforme accessible en ligne.

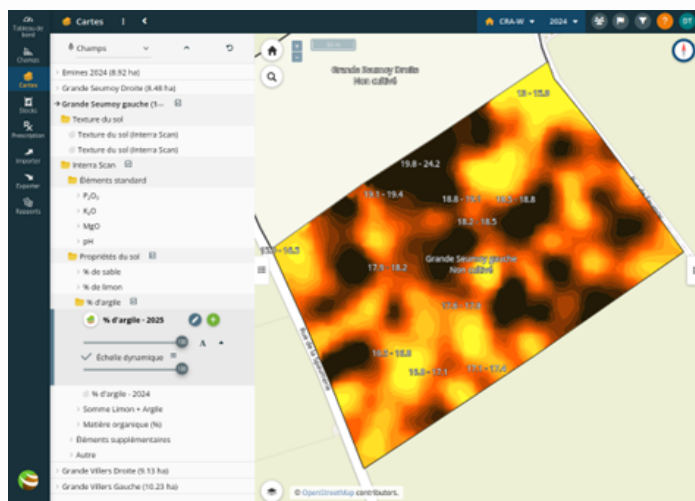


Figure 4 : Interface de la plateforme INTERRA Scan (Syngenta).

La plateforme permet également à l'agriculteur de générer lui-même des cartes de préconisation à dose variable, en utilisant une carte INTERRA Scan comme source de variabilité. Ces cartes peuvent être téléchargées dans un format compatible avec le matériel agricole du client.

Les offres INTERRA Scan incluent un accompagnement agronomique de base. Trois niveaux d'analyse sont proposés :

- Offre 12 paramètres : éléments majeurs (P, K), texture, matière organique, etc.
- Offre 22 paramètres : les 12 précédents + calcium, manganèse, fer, CEC, etc.
- Offre 27 paramètres : les 22 précédents + carbone actif (% et t/ha), etc.

Solutions de TCPC : comment juger de leur fiabilité ?

Pour évaluer la fiabilité des cartes produites par les deux solutions testées, des analyses de sol en laboratoire ont été réalisées sur chaque parcelle du projet. Ces analyses, totalement indépendantes de celles effectuées par les prestataires de TCPC, ont servi de référence pour comparer les résultats obtenus.

Au total, 156 points d'analyse ont été sélectionnés, soit en moyenne un point par hectare. À chacun de ces points, des échantillons de sol ont été prélevés puis envoyés dans deux laboratoires distincts pour analyse :

- Une analyse physique et chimique du sol effectuée par le laboratoire du Centre provincial de l'agriculture et de la ruralité - ASBL Brabant Wallon Agro-Qualité (BW).
- Une analyse chimique réalisée par le Service Pédologique de Belgique (BDB - SPB)

Cette double analyse a permis de couvrir l'ensemble des paramètres physico-chimiques cartographiés par les solutions de TCPC. Sept paramètres identiques ont été mesurés par les deux laboratoires, ce qui a permis d'évaluer la répétabilité des résultats entre laboratoires. Cette estimation est essentielle pour juger de la fiabilité des cartes produites par les dispositifs de TCPC.

Pour comparer les résultats des laboratoires entre eux et les résultats des laboratoires et des solutions, deux statistiques ont été utilisées : une statistique mesurant la cohérence absolue (l'exactitude, à savoir la proximité avec une ligne d'identité estimée) et la précision (la dispersion des mesures estimée à l'aide d'un indice de corrélation).

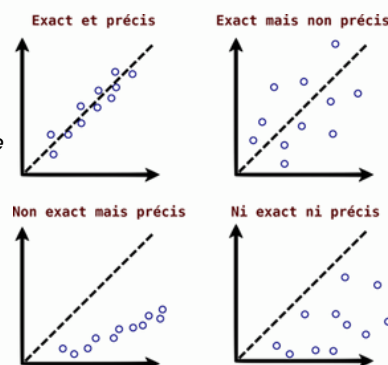


Figure 5 : Notion d'exactitude et de précision.

La ligne à 45° en pointillée représente la ligne d'identité entre les valeurs de l'axe X et Y (CRA-W, 2025).

Quel est le degré de répétabilité des résultats des analyses entre laboratoires ?

Les laboratoires n'utilisent pas toujours les mêmes méthodes d'analyses. C'est le cas pour les deux laboratoires choisis pour analyser les échantillons de sols aux points d'analyses.

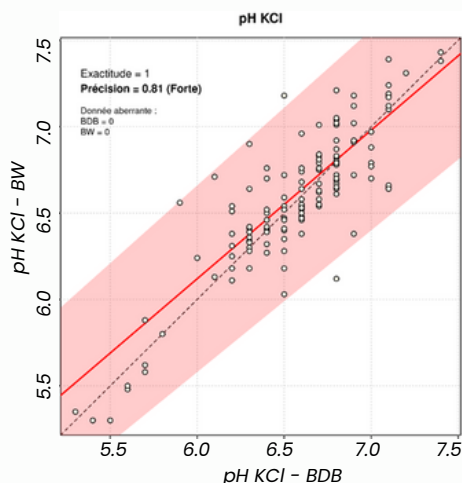


Figure 6 : Exemple de comparaison entre les résultats des analyses de laboratoires effectuées par BW et BDB pour le pH.

Deux méthodes d'analyses ont été utilisées : BW (ISO 10390 ; CMA/2/II/A.20) et BDB (BOC PTCS3-NF ISO 10390).

La ligne en pointillés à 45° représente la ligne d'identité entre les valeurs des axes X et Y. La ligne rouge correspond à la droite de régression (Y ~ X) accompagnée de son intervalle d'incertitude représenté en rouge plus clair (CRA-W, 2025).

La comparaison des résultats entre laboratoires montre qu'il peut exister des disparités entre les résultats des laboratoires, dont l'ampleur varie selon les paramètres étudiés. Par exemple pour le pH et le C. organique, la cohérence absolue (exactitude) comme relative (la précision ou corrélation) sont très élevées. En revanche, pour le phosphore (P), bien que la cohérence relative (la précision ou corrélation) soit forte, indiquant que les variations spatiales sont bien captées, la cohérence absolue (l'exactitude) est faible, ce qui signifie que les valeurs absolues diffèrent entre laboratoires.

De ce fait, pour des résultats très différents entre le laboratoire et les solutions de TCPC, il devient difficile de déterminer si cet écart est dû à une réelle différence de performance des solutions de TCPC ou simplement à des variations liées aux méthodes d'analyse et aux laboratoires utilisés pour l'étalonnage.

**! \ Les divergences dans les protocoles de quantification et les modèles de recommandations de doses limitent la pertinence d'évaluer une cohérence absolue (exactitude) entre les laboratoires et les solutions. Chaque laboratoire et solution ont leur propre méthodologie pour interpréter leurs propres résultats ! **

En conséquence, cette fiche se concentre en priorité sur la cohérence relative (corrélation ou précision) des propriétés physico-chimiques du sol entre laboratoires et solutions, c'est-à-dire la capacité des différentes méthodes à détecter les mêmes variations sur le terrain.

Pourquoi estimer le degré d'hétérogénéité des paramètres physico-chimiques analysés ?

Étant donné que toute analyse de sol présente une marge d'erreur, il est essentiel de s'assurer que l'hétérogénéité observée pour un paramètre dépasse cette incertitude. Si l'hétérogénéité mesurée est inférieure à la marge d'erreur des laboratoires ou des solutions, il devient alors impossible de distinguer une hétérogénéité réelle d'un simple bruit de mesure.

Par ailleurs, certains paramètres peuvent être intrinsèquement homogènes, c'est-à-dire ne présenter que peu ou pas d'hétérogénéité à l'échelle spatiale considérée. Dans ce cas, une analyse approfondie de ces paramètres n'est pas justifiée, car ils ne fournissent pas d'information utile pour la mise en œuvre d'une modulation des interventions agronomiques.

La première étape dans l'interprétation d'une carte issue des TCPC consiste donc à estimer le degré d'hétérogénéité des paramètres étudiés.

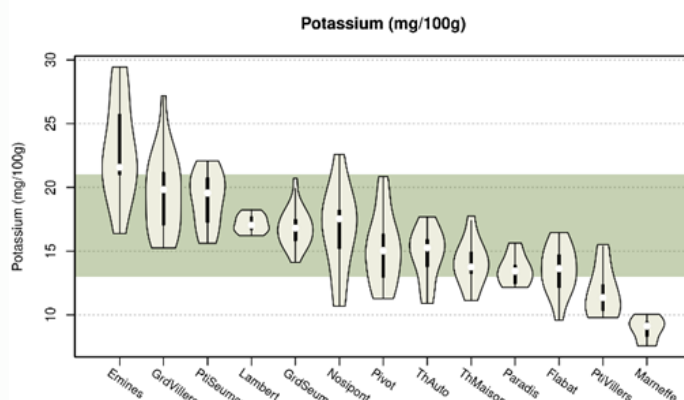


Figure 7 : Graphique de la représentation de la dispersion du potassium à l'échelle de l'exploitation et des parcelles (CRA-W, 2025).

Le pourcentage d'argile, le pH, ainsi que les teneurs en azote, calcium (Ca), potassium (K), magnésium (Mg), sodium (Na), phosphore (P) et zinc (Zn) présentent, sur les parcelles du projet, une hétérogénéité suffisante, au regard de l'incertitude de mesure, pour justifier une analyse plus approfondie.

Mais ce n'est pas le cas pour le bore (B), la capacité d'échange cationique (CEC), le carbone organique, le cuivre, le fer, le manganèse et le soufre. Le carbone organique a néanmoins été conservé dans les comparaisons présentées ci-après, en raison de son importance en tant que variable agronomique.

Les solutions de cartographie des propriétés physico-chimiques du sol

Est-ce que les solutions testées sont fiables ?

La solution Vérís MSP3

La cohérence relative (corrélation ou précision) entre les analyses de laboratoire et les données Vérís MSP3 était modérée pour le pH et la matière organique.

Les meilleurs résultats des comparaisons entre les résultats de laboratoire et des solutions TCPC étaient pour la comparaison entre le % d'argile et conductivité électrique du sol (Figure 8).

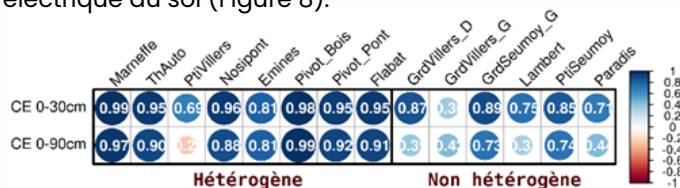


Figure 8 : Matrice de corrélation entre la conductivité électrique du sol obtenue à deux profondeurs (CE 0-30 cm et CE 0-90 cm) et le % d'argile pour les différentes parcelles du projet (nom des colonnes). Les parcelles ont été ordonnées en fonction de leur degré d'hétérogénéité sur le pourcentage d'argile (CRA-W, 2025).

Pour ces paramètres, seules des comparaisons à l'échelle de la parcelle ont pu être réalisées, car la conductivité électrique du sol est fonction des conditions rencontrées sur cette parcelle à un instant donné (le taux d'humidité du sol influence fortement la conductivité du sol). La cohérence relative (précision) entre les analyses de laboratoire et les données Vérís MSP3 étaient très forte à forte sur 86 % (12/14) des parcelles du projet et modérée à faible sur 14% (2/14) des parcelles du projet.

La solution INTERRA Scan

Les comparaisons entre les résultats des analyses de laboratoires (BW) et les données INTERRA Scan sont présentées à la Figure 9 pour le pH.

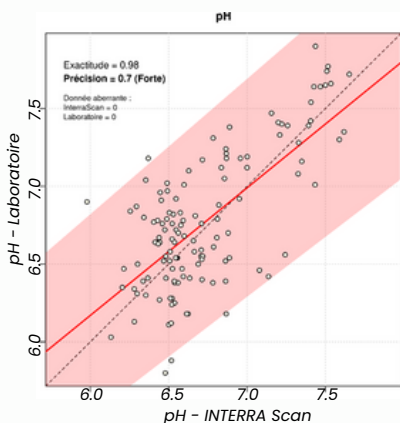


Figure 9 : Exemple de comparaison entre les résultats des analyses de laboratoires effectuées par BW et des données INTERRA Scan pour le pH. La ligne en pointillés à 45° représente la ligne d'identité entre les valeurs des axes X et Y.

La ligne rouge correspond à la droite de régression ($Y \sim X$) accompagnée de son intervalle d'incertitude représenté en rouge plus clair (CRA-W, 2025).

La cohérence relative (corrélation ou précision) entre les analyses de laboratoire et les données INTERRA Scan était forte pour le Zinc (Zn), le carbone organique, le phosphore (P) et le pH ; modérée pour le calcium (Ca), le ratio C / Argile, le potassium (K), le pourcentage d'argile et le sodium (Na) ; faible pour le magnésium (Mg).

Que retenir de ces comparaisons ?

Bien que les résultats des comparaisons entre laboratoires et solutions sont satisfaisants sur les paramètres agronomiques principaux (MO, pH) pour la solution INTERRA Scan et très satisfaisants pour la texture du sol pour la solution Vérís MSP3 en termes de cohérence relative, l'interprétation agronomique des données issues de TCPC n'en reste pas moins compliquée :

- Le taux d'hétérogénéité des paramètres agronomiques sélectionnés doit être absolument étudié en considérant l'incertitude de mesures pour savoir si oui ou non une modulation de dose doit être mise en œuvre.
- L'incertitude ou erreur de mesure n'est pas toujours fournie par défaut par les laboratoires d'analyses et les solutions testées. Ces paramètres sont essentiels pour évaluer le paramètre étudié.
- Les comparaisons des résultats entre laboratoires, ainsi qu'entre les laboratoires et les solutions testées, montrent que la quantification d'un même paramètre du sol par deux méthodes différentes peut produire des résultats corrélés, mais divergents en termes de valeur absolue. Interpréter de manière équivalente des résultats issus de méthodes distinctes constitue donc une erreur.

Une mauvaise interprétation des données peut avoir des conséquences directes sur les rendements. En effet les quantités d'intrants à apporter sur les parcelles peuvent être sur ou sous évaluées. Aux vues de ces résultats et bien que les TCPC semblent prometteuses, le CRA-W conseille de manipuler précautionneusement les cartes issues de TCPC et de toujours se référer à la fois à la propre expérience de ses parcelles et à l'avis d'un agronome pour interpréter les cartes issues des TCPC.

Quels impacts sur le levier agronomique ?

Les comparaisons encourageantes entre cartographie TCPC et analyses de laboratoire ont conduit à des épandages modulés de chaux, de potasse et de matière organique, détaillés dans la **fiche technique n°4**.

Par ailleurs, les meilleurs résultats de correspondance ont été obtenus avec la cartographie par conductivité électrique, qui s'avère particulièrement fiable pour caractériser la texture du sol. Cette robustesse est d'autant plus pertinente dans le cadre de la directive MR14 (Fiche technique n°4), centrée sur le ratio COT / % d'argile. Une cartographie précise de la texture permet en effet de cibler efficacement les zones à améliorer en priorité. En effet, les zones argileuses ont généralement des ratios plus défavorables selon les critères de la MR14.

Les solutions de cartographie des propriétés physico-chimiques du sol

Quels impacts sur le levier économique ?

Véris : Le projet montre que ce type de cartographie permet d'organiser les apports sur une rotation, ce qui implique au niveau des coûts, que ce type de cartographie doit être valorisée sur une rotation (5 ans). Ce qui permet de calculer le coût annuel ci-dessous :

Coût estimé : $(1.544/5) + (350/16) = 330\text{€ /an /parcelle}$ (pour une exploitation de 16 parcelles et 159 hectares sur une période de 5ans)

INTERRA Scan : Tout comme la solution Véris précédente, cette cartographie peut être valorisée sur la durée d'une rotation de 5 ans. Ce qui permet de calculer le coût annuel ci-dessous :

Coût estimé : $(1.579/5) = 316\text{€ /an /parcelle}$ (pour une exploitation de 16 parcelles et 159 hectares sur une période de 5ans)

La comparaison des deux systèmes (Véris MSP3 et INTERRA Scan) montre que leurs coûts sont très similaires. Par ailleurs, les résultats du projet suggèrent que ce type de cartographie peut être réservé aux parcelles présentant une hétérogénéité significative. Il n'est donc peut-être pas nécessaire de cartographier l'ensemble des parcelles tous les cinq ans, mais plutôt de cibler celles où une variabilité des rendements a été mise en évidence.

Témoignage de Manu JADIN
de La Ferme du Plein AirConnaissiez-vous la technique du scanning
de sol avant le lancement du projet ?

Oui, Apligeer, la société qui contracte les légumes d'industrie utilise le scanner de sol Véris depuis plusieurs années. La société prend en charge une partie du coût financier du scanning. Je suis très satisfait de ce service.

Est-ce que sans cette prise en charge
partielle du coût financier, vous utiliseriez
malgré tout cette technique ?

Oui, je pense que ça en vaut la peine. Nous cultivons les mêmes parcelles chaque année, et la base est d'avoir des terres en ordre. Les analyses de sol donnent des infos moyennes. Mais d'expérience, la moyenne cache souvent des surprises importantes, notamment concernant le pH et le taux de matière organique. Je dois dire que j'ai été surpris des hétérogénéités de mes parcelles. On pourrait croire qu'en Hesbaye, dans des terres profondes et remembrées depuis les années 80, les terres sont homogènes, mais ce n'est pas toujours le cas.

Pourquoi le pH en particulier ?

Ce paramètre est mesuré de manière directe par l'outil grâce à une sonde pH installée directement sur celui-ci. Le coefficient de corrélation du pH n'est peut-être pas trop élevé selon la rigueur scientifique, mais ces valeurs obtenues à travers l'ensemble de nos parcelles vont me permettre de déterminer les grandes variations qu'il faudra traiter en priorité.

Quels sont pour vous les avantages et
inconvénients des outils de scanning du sol ?

Le Véris est un outil qui permet de mesurer quelques paramètres essentiels pour nous les agriculteurs comme le pH, l'argile (via la conductivité électrique du sol) et la MO. Il faut par contre rester prudents pour les interprétations des autres paramètres.

Je conseille à tout le monde d'au moins essayer d'utiliser le scanning de sol (comme le Véris) sur ses parcelles les plus hétérogènes. Cela permettra d'en constater les avantages.

Conseil DuratechFarm

Réaliser le scan avant les apports d'amendements, qui pourraient altérer la qualité des mesures.

D'autres fiches techniques

Divers facteurs influencent l'hétérogénéité intraparcellaire des rendements. La **fiche technique n°2** présente ces facteurs et leur importance sur l'hétérogénéité intraparcellaire des rendements. La **fiche technique n°4** présente différents cas pratiques de modulation de dose des fertilisants et des amendements.



Contacts :

CRA-W – Denis Tourneur : d.tourneur@cra.wallonie.be
CRA-W – Quentin Limbourg : q.limbourg@cra.wallonie.be
CRA-W – Jean Artois : j.artois@cra.wallonie.be
Ferme du Plein Air – Manu Jadin : emmanuel.jadin@ardo.com
UCLouvain – Sébastien Lambot : sebastien.lambot@uclouvain.be
WalDigiFarm – Sébastien Weykmans : contact@waldigifarm.be