

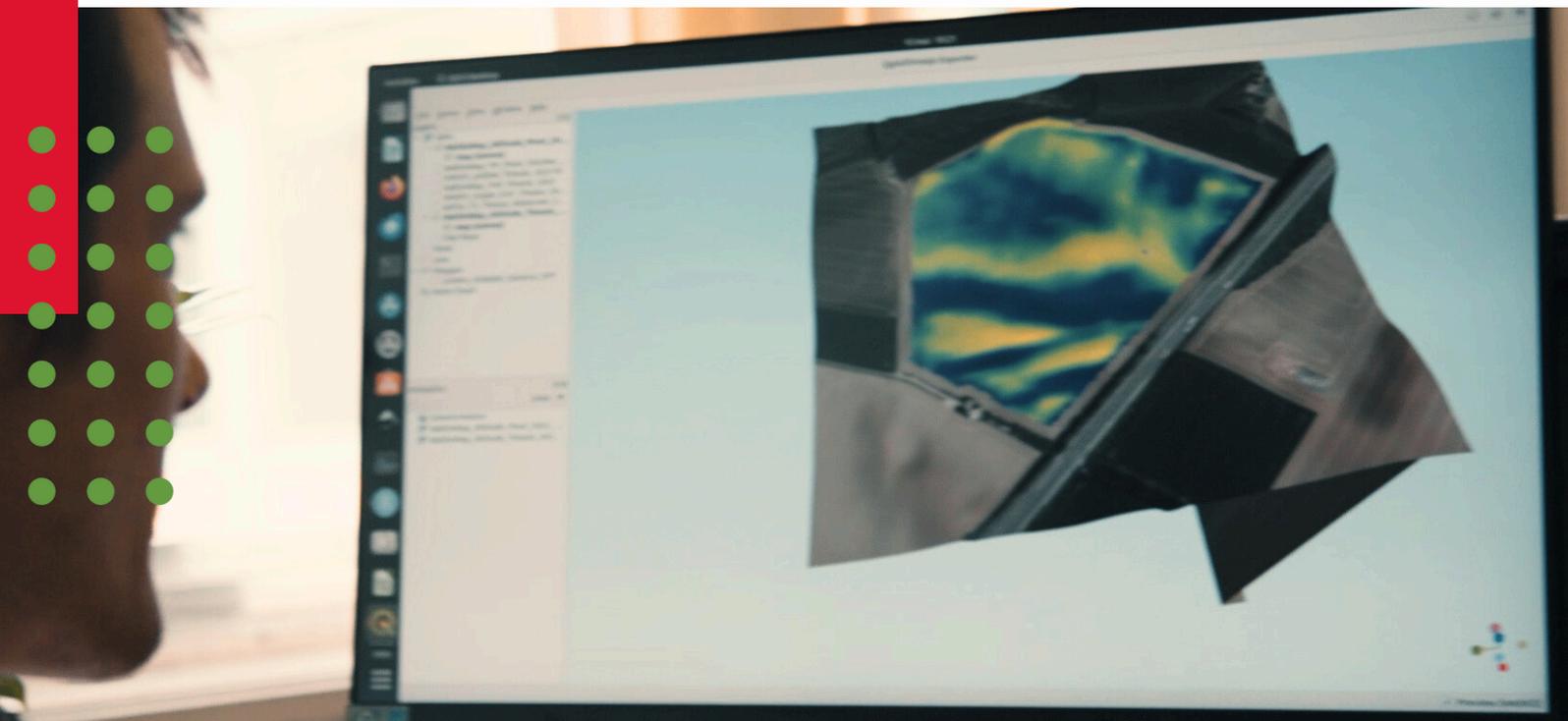
L'hétérogénéité des rendements au sein des parcelles

Fiche n°2 - Projet DuratechFarm

L'Hétérogénéité intraparcellaire des Rendements (HIRs) désigne les variations de rendements au sein des parcelles.

L'origine de cette hétérogénéité spatiale peut être due à de nombreux facteurs, comme les propriétés physico-chimiques du sol, la topographie, ou encore les pratiques culturales, qui ne sont pas toujours uniformes à l'échelle intra-parcellaire.

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 :



L'hétérogénéité des rendements au sein des parcelles

Pourquoi caractériser l'HIRs ?

Souvent perçue comme une contrainte, l'HIRs peut aussi devenir un levier agronomique sur lequel agir. À condition de bien comprendre ses causes, elle permet d'ajuster localement les pratiques agricoles : fertilisation, densité de semis, irrigation, traitements phytopharmaceutiques, etc. Adapter ces interventions à l'hétérogénéité des conditions dans la parcelle peut aider à maintenir, voire améliorer les rendements et de réduire les coûts de production.

Comment identifier et quantifier l'HIRs ?

Les capteurs de rendement embarqués

Pour les céréales, les moissonneuses-batteuses équipées de capteurs de rendement sont de plus en plus utilisées et permettent d'obtenir des cartes de rendement.

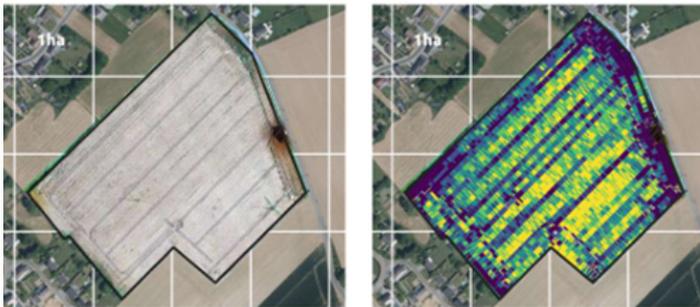


Figure 1 : Cartes comparant une image de la parcelle j-1 avant la moisson acquise par drone et une carte de rendement obtenue avec un capteur de rendement (CRA-W, 2024).

Bien que ces cartes puissent présenter un certain nombre d'erreurs de mesures, elles sont relativement précises et représentent la meilleure source d'information pour identifier et quantifier l'HIRs ($\pm 11\%$ de différence avec le rendement pesé lors du déchargement du grain au silo sur les essais DTF pour la saison 2024).

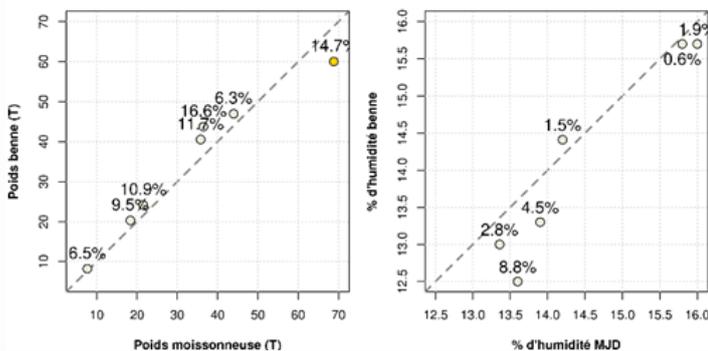


Figure 2 : Comparaison entre les mesures réalisées au silo et les mesures enregistrées par la moissonneuse pour le poids humide et le taux d'humidité du grain. Cette comparaison a été réalisée sur les parcelles de froment d'hiver (les points blancs) et d'épeautre (le point jaune) cultivées en 2024. Les pourcentages d'erreur sont aussi représentés sur cette figure en prenant les mesures réalisées au silo comme références (CRA-W, 2025).

L'entrepreneur agricole de la Ferme du Plein Air disposant d'une moissonneuse John Deere, les données des capteurs ont été analysées via le logiciel JD Operations Center proposé par la marque. Mais il est possible d'installer des capteurs de rendement sur tout type de moissonneuse.

Malheureusement, pour beaucoup de cultures autres que céréalières, cet équipement est soit inexistant, soit biaisé par la tare terre par exemple. Cependant, des alternatives existent pour identifier et quantifier l'HIRs lorsque les machines de récolte ne le permettent pas.

La télédétection

Des plateformes numériques, gratuites ou payantes, permettent d'obtenir régulièrement des images satellites fiables sur l'état des cultures. Ces informations sont utilisées pour cartographier l'hétérogénéité de la biomasse d'une culture et établir des diagnostics sur l'HIRs. Le lien entre le HIRs estimé grâce aux capteurs de rendement embarqués et différents indicateurs sur l'état de santé de la culture issus de la télédétection a été étudié par le CRA-W au cours du projet.

L'indicateur d'hétérogénéité du développement foliaire (HDF) fourni par Belcam

Cet indice est calculé à partir de l'évolution d'un indice de surface foliaire (LAI), obtenu grâce à l'imagerie spatiale. L'évolution foliaire de la culture est suivie au cours de l'année, de l'émergence au début de la sénescence. La croissance foliaire de chaque zone de la parcelle est ensuite comparée à la croissance moyenne de la parcelle, afin d'identifier les zones présentant une croissance plus forte ou plus faible que la moyenne parcellaire. La plateforme Belcam est gratuite et les données sur vos cultures peuvent être librement consultées une fois votre inscription sur le site effectuée.



www.belcam.info

Avec le soutien de :



L'hétérogénéité des rendements au sein des parcelles

La production de matière sèche cumulée du jour du semis au jour de la récolte par IrriWatch (Hydrosat)

“The Surface Energy Balance Algorithm for Land” (SEBAL) permet d’estimer l’évapotranspiration et les flux d’énergie à la surface du sol et d’en déduire la quantité de carbone assimilée par la plante quotidiennement. Cet algorithme utilise des données issues de l’imagerie spatiale (visible et proche infrarouge pour cartographier la végétation et thermique pour estimer la température de surface) et des données météorologiques pour estimer la production de matière sèche cumulée du jour du semis au jour de la récolte (PMSC). La plateforme IrriWatch nécessite un abonnement annuel.

Dans le cadre du projet DuratechFarm, des cartes de rendements issues de capteurs embarqués, les indicateurs d'HDF (Belcam) et le PMSC (IrriWatch) ont été comparés sur leurs capacités à identifier et quantifier les HIRs. Cependant d’autres plateformes existent comme OneSoil qui fournit des indices de NDVI.

Comparaison des indicateurs pour identifier et quantifier l’HIRs

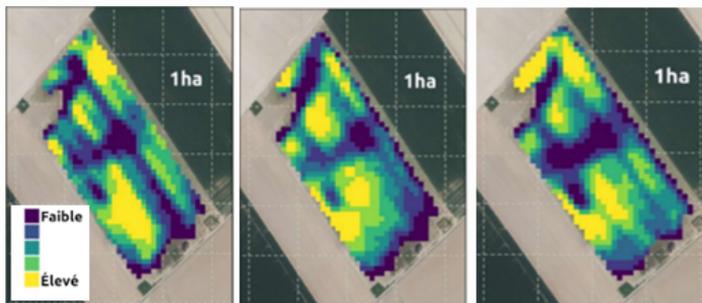


Figure 3 : Comparaison entre les données des capteurs de rendement des moissonneuses (carte de gauche), les données sur la pmsc fournies par IrriWatch (carte du milieu) et l’indicateur d’hétérogénéité du développement foliaire fourni par Belcam (carte de droite).

Les indices HIRs fournis par Belcam sont généralement plus étroitement liés aux rendements en céréales estimés avec le capteur de rendement embarqué (épeautre, froment d’hiver et maïs grain) que le PMSC d’Irriwatch, selon les données du projet. Ce constat rejoint des observations déjà faites : certains indicateurs de végétation issus de la télédétection, calculés à des moments clés du développement du froment, permettent d’estimer assez précisément les rendements lors de la récolte.

La fiabilité des mesures

La Figure 4 montre que les corrélations entre les indices satellitaires et les rendements des moissonneuses sont modérées à élevées. Les valeurs sont généralement supérieures à 0,6, à l’exception de l’épeautre et du maïs grain en 2024 avec IrriWatch.

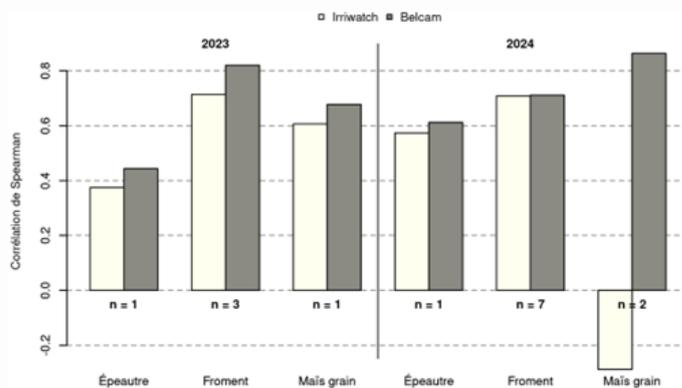


Figure 4 : Corrélations de Spearman moyennes entre les données issues des capteurs de rendement des moissonneuses et les indices fournis par IrriWatch et Belcam pour différentes cultures au cours des saisons 2023 et 2024. Le nombre de parcelles utilisées pour calculer les corrélations moyennes est indiqué à la base de chaque barre (CRA-W, 2025).

Ensuite, les indices fournis par Belcam présentent systématiquement des corrélations plus élevées que ceux d’Irriwatch, suggérant une meilleure capacité de Belcam à refléter l’hétérogénéité des rendements pour les cultures de céréales.

Enfin, en se concentrant uniquement sur le froment d’hiver, culture pour laquelle le nombre de parcelles est le plus important dans le projet, on observe des corrélations plus élevées en 2023 qu’en 2024. Cette différence pourrait s’expliquer par la forte couverture nuageuse en 2024, qui aurait pu altérer la qualité des données satellitaires et limiter leur précision pour estimer l’hétérogénéité des rendements.

En revanche, des prélèvements réalisés sur le terrain indiquent que le PMSC d’IrriWatch fournit des estimations de rendement globalement fiables pour les oignons et les carottes, mais s’avère moins précis dans le cas des haricots (résultats non présentés ici). Quant aux indicateurs HDF de Belcam, ils semblent surtout refléter la densité des fanes et de biomasse aérienne, sans vraiment permettre d’anticiper précisément le rendement final pour ces trois cultures.

Comment identifier les variables explicatives de l'hétérogénéité des rendements ?

Le CRA-W tente de développer des modèles corrélatifs de l'hétérogénéité intraparcellaire des rendements. Ces modèles tentent d'identifier les paramètres les plus pertinents pour expliquer les rendements des cultures de céréales (froment d'hiver, épeautre, maïs grain). Les paramètres suivants ont été sélectionnés pour comprendre leurs effets sur le HIRs :

La structure du sol

Les différences dans la structure du sol, telles que la compaction ou une mauvaise aération, peuvent créer des zones où les racines des plantes se développent moins bien. Ces problèmes sont souvent difficiles à identifier uniquement à partir des analyses de sol classiques. L'observation de terrain, comme la réalisation de fosses pédologiques ou l'utilisation de pénétromètres, peut aider à détecter ces problèmes.

Contexte météorologique

Les conditions climatiques jouent un rôle déterminant dans l'hétérogénéité intraparcellaire. Par exemple, des périodes de sécheresse ou des pluies excessives peuvent avoir des effets différenciés sur la parcelle en fonction de la structure et de la texture du sol.

Le parcellaire fantôme

Le parcellaire fantôme désigne l'ensemble des sous-parcelles historiques constituant la parcelle actuelle. Ce découpage historique peut influencer la plupart des propriétés physico-chimiques du sol.

Deux dynamiques opposées expliquent ces particularités :

D'une part, ces sous-parcelles ont pu être délimitées en fonction des propriétés physico-chimiques des sols pour leur en attribuer un usage agricole spécifique. Par exemple, les terres lourdes et les zones humides étaient souvent occupées par les prairies permanentes alors que les zones plus limoneuses étaient destinées aux cultures.

D'autre part, les pratiques agricoles de ces sous-parcelles ont elles-mêmes modifiées certaines propriétés du sol. Chaque agriculteur possède en effet ses propres pratiques agricoles, qui conditionnent les propriétés du sol.

Par exemple, les parcelles à proximité de l'exploitation ont pu recevoir davantage d'amendement organique que les parcelles plus éloignées, ou encore, chaque agriculteur pouvait avoir des pratiques différentes en ce qui concerne la profondeur de labour, la gestion des adventices, le type de rotation et d'interculture.

Il est donc nécessaire de retrouver et de numériser ce parcellaire fantôme. Si ce parcellaire est identique à l'HIRs identifiée, il faut alors combiner des analyses de sol spécifique dans chacune des zones identifiées afin de définir les moyens d'actions en fonction des zones de gestion correspondant aux parcelles fantôme pour améliorer la conduite d'une culture implantée sur une parcelle remembrée.

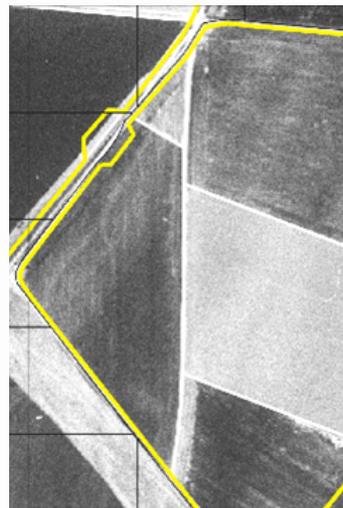


Figure 5 : Orthophotographie de 1971 avec en jaune les contours actuels des parcelles (Géoportail de la Wallonie, 2025).

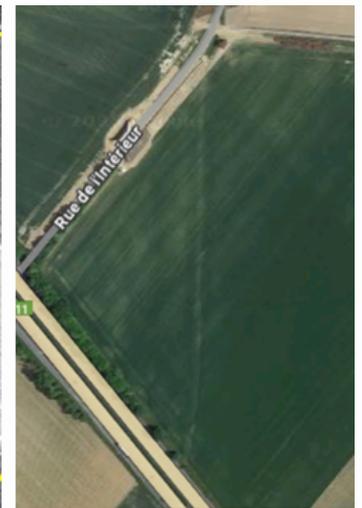


Figure 6 : Orthophotographie de 2025 avec le tracé d'un ancien chemin qui se distingue (Google Maps, 2024).

Comment identifier ce parcellaire fantôme ?

En région wallonne, ce parcellaire peut être identifié en s'appuyant sur les cartes disponibles gratuitement sur le **Géoportail de la Wallonie**.



www.geoportail.wallonie.be/walonmap

Parmi les documents les plus utiles figurent les cartes anciennes de Ferraris (1770-1778) et celle du Dépôt de la Guerre (1865 - 1880), qui renseignent sur l'occupation des sols (prairie, cultures, forêt, zone humides, etc.). Les orthophotoplans constituent également une ressource essentielle. Il s'agit de photographies aériennes prises à intervalles réguliers depuis 1971. Elles permettent de visualiser avec précision les délimitations des parcelles au fil du temps et de visualiser les remembrements réalisés depuis cette date.



L'hétérogénéité des rendements au sein des parcelles

La topographie

La topographie peut également avoir un effet direct sur les propriétés physico-chimiques du sol. En effet, le relief peut provoquer du ruissellement et de l'érosion ce qui va différencier les propriétés physico-chimiques des sols situés sur les sommets, les pentes et les creux.

Encore une fois, la topographie peut être analysée en utilisant les cartes de relief mises à disposition par le Géoportail de la Wallonie.

Deux indices ont été sélectionnés pour représenter au mieux l'impact du relief :

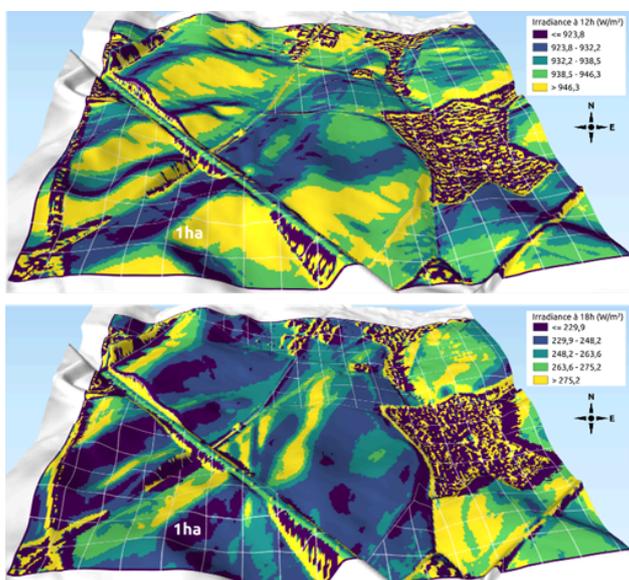
- **L'indice topographique de position (TPI)** qui permet de visualiser les creux et les bosses des parcelles.
- **L'indice topographique d'humidité (TWI)** qui permet de visualiser les zones probables d'écoulements et de stagnation de l'eau sur les parcelles.

L'irradiation solaire globale

L'énergie solaire reçue par les cultures influence fortement leur développement grâce au phénomène de photosynthèse et d'évapotranspiration. Selon le relief et les aménagements en bordure de parcelles, cette irradiation solaire peut fortement varier au sein d'une même parcelle.

Pour évaluer cette hétérogénéité, une cartographie de l'irradiance solaire théorique pour une journée ensoleillée (exprimée en W/m^2) a été réalisée, heure par heure, entre 8h et 18h, sur la période allant du 1er mars au 30 juin.

Afin de rapprocher cette modélisation des conditions réelles de terrain, les données issues de la plateforme Agromet.be des trois stations météo les plus proches des parcelles étudiées ont été utilisées pour calculer un coefficient de correction. Ce coefficient a ensuite permis d'ajuster les cartes d'irradiance théorique en intégrant les variations météorologiques réellement observées.



Sur quels paramètres physico-chimiques agir ?

De nombreux ouvrages ont été réalisés à ce sujet, le livre de Gilbert Grenier explique que tout élément influençant le développement de la culture a une incidence sur la variabilité intraparcellaire du rendement. Il n'est pas possible d'influencer toutes les variables comme par exemple, le climat et certaines caractéristiques des parcelles telles que la topographie, la profondeur et la texture du sol (Grenier G., 2018).

Le choix des variables sur lesquelles agir est vaste. Mais, il est important de les prioriser, car ces dernières n'ont pas toutes le même impact sur le rendement. Les paramètres physico-chimiques impactant le plus le rendement selon la littérature scientifique sont la MO, le pH, la fertilisation P et K et ensuite l'azote. Mais, chaque parcelle possède un contexte particulier pour lequel les caractéristiques impactant le rendement seront différentes de la parcelle voisine.

C'est en partant de ce constat que les équipes du CRA-W ont mis en place un modèle pour prioriser les paramètres sur lesquels agir.

Les modèles corrélatifs de l'HIRs

Au cours du projet DuratechFarm, le CRA-W a développé des modèles corrélatifs visant à comprendre les facteurs influençant l'HIRs, ainsi qu'à prédire les rendements agricoles sur base des variables explicatives sélectionnées. Des modèles de type Boosted Regression Trees (BRT) ont été retenus pour étudier l'HIRs. Ces modèles sont particulièrement performants pour capturer des relations complexes et non linéaires entre les variables à expliquer (l'HIRs) et les variables agronomiques retenues pour mieux comprendre l'hétérogénéité des rendements.

Les variables sélectionnées pour l'analyse

Seul un sous-ensemble de variables a pu être testé pour ses effets sur le HIRs. Les variables explicatives sélectionnées pour cette analyse doivent être disponibles sous forme de carte et présenter une hétérogénéité au sein des parcelles (i.e., une information disponible à une échelle intra-parcellaire). Un certain nombre de variables explicatives ont aussi été écartées, car elles ne présentaient pas des niveaux de qualité suffisants quand elles ont été comparées à des analyses de sol de laboratoire.



Figure 7 : Irradiance solaire théorique (W/m^2) calculée à 12h (carte du haut) et à 18h (carte du bas) le 30 juin 2024 (CRA-W).

Avec le soutien de :

L'hétérogénéité des rendements au sein des parcelles

L'importance de la multi-colinéarité

Les variables explicatives sélectionnées pour tenter d'expliquer l'HIRS apportent parfois au modèle des informations qui se recoupent, notamment lorsqu'elles présentent une forte corrélation entre elles.

Par exemple, la topographie d'une parcelle au relief marqué peut entraîner des différences notables de texture du sol (certaines zones retenant plus de limons ou d'argiles), de taux d'humidité théorique, et une exposition au soleil plus ou moins favorable.

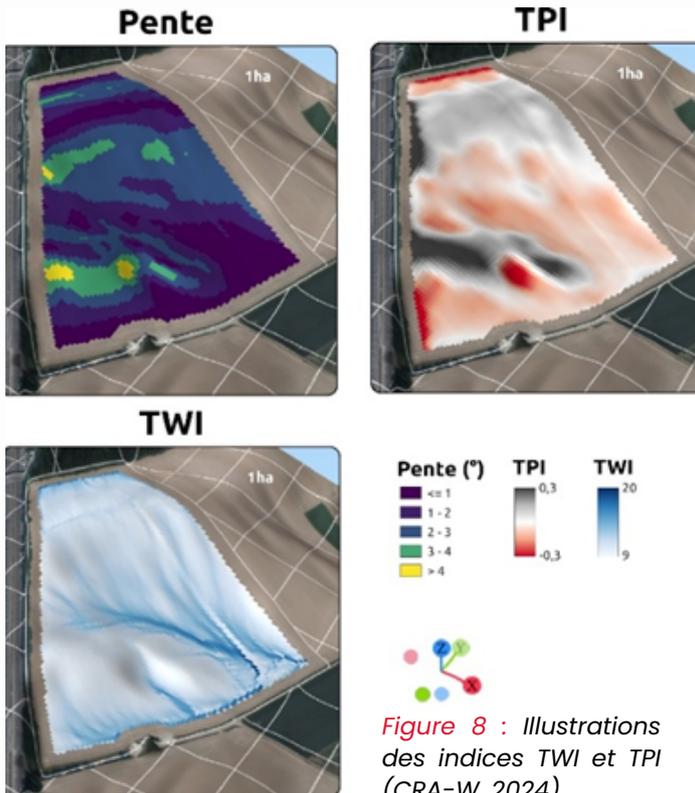


Figure 8 : Illustrations des indices TWI et TPI (CRA-W, 2024)

Quelles conséquences pour le levier agronomique ?

Les modèles sont globalement plus performants pour les parcelles en agriculture conventionnelle en comparaison avec les parcelles en agriculture biologique.

Ce constat peut s'expliquer par la facilité technique d'apporter de l'azote en agriculture conventionnelle. Ces apports généralement plus élevés ne font plus de l'azote un facteur limitant, dès lors d'autres facteurs limitants peuvent apparaître. D'autre part, il est à noter que l'effet des maladies pour la saison 2024 était plus important en agriculture biologique qu'en conventionnel, la saison ayant été particulièrement chaude et humide. Et la présence de maladie n'a pas été incluse dans le modèle. D'ailleurs, les performances des modèles menés par le CRA-W sont plus faibles pour la saison 2023/2024.

Les contributions relatives de chaque facteur explicatif

La texture du sol apparaît comme un facteur déterminant des rendements, tout particulièrement sur les parcelles Flabat et Paradis avec une contribution supérieure à 40 %. Ce résultat est systématiquement reproductible sur deux saisons culturales.

Ainsi, 75 % (6/8) des modèles BRT retenus montrent que la texture du sol (directement ou via des indicateurs topographiques) constitue un facteur structurant dans la compréhension de l'hétérogénéité des rendements. Le pourcentage d'argile est toujours négativement corrélé au rendement.

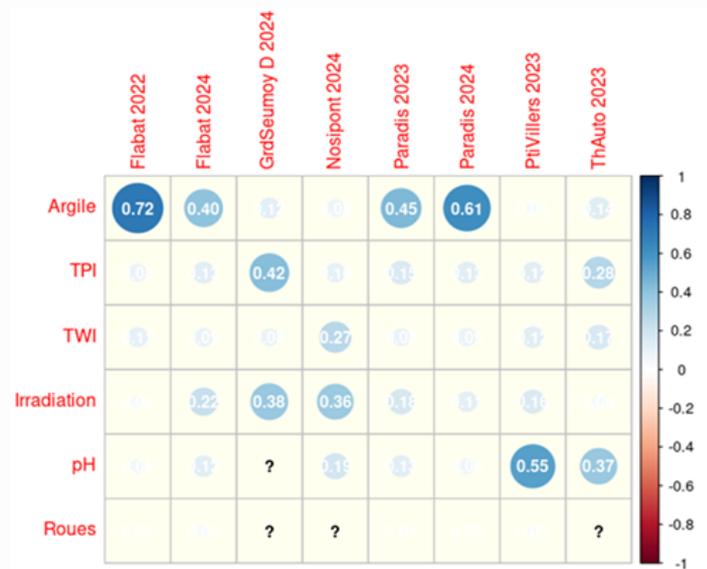


Figure 9 : Contribution relative des modèles Boosted Regression Trees (BRT). La somme des contributions sur une parcelle et une saison (une colonne) est égale à 1. Les "?" indiquent une absence de données. (CRA-W, 2024)

Un autre facteur limitant fortement le rendement est le pH. En effet, en 2023 pour les parcelles Petit Villiers et dans une moindre mesure ThAuto, le pH a été l'élément le plus limitant.



L'hétérogénéité des rendements au sein des parcelles

Témoignage de Manu JADIN de La Ferme du Plein Air



Manu JADIN et **Caroline DEVILLIERS** exploitent 175 ha, dont la majorité en bio.

L'exploitation possède deux zones d'activités : Thorembais-Saint-Trond dans le Brabant-Wallon et Meux dans le Namurois.

Comment avez-vous réagi à l'hétérogénéité intraparcellaire des rendements de vos parcelles ?

J'ai été surpris de constater à quel point la compaction des fourrières impacte le rendement. D'autre part, la topographie de la parcelle est impactante, mais les variations de rendements étaient relativement peu liées au parcellaire fantôme. En effet, le remembrement en vigueur dans la région de Meux a eu lieu dès les années 1980, ce qui a permis de lisser certaines hétérogénéités au cours du temps.

Quel est le facteur influençant le plus l'hétérogénéité intraparcellaire de vos rendements ?

La topographie reste le principal facteur d'hétérogénéité sur l'exploitation. Elle influence directement les taux d'argile et de matière organique présents dans les parcelles, sans doute à cause de l'érosion.

Ce phénomène est visible lors du labour : quand on constate qu'une couche de sol plus claire de 2 cm d'épaisseur, est remontée à la surface, cela signifie que l'on a perdu 2cm de sol par érosion depuis le dernier labour. C'est énorme !

Cette couleur plus claire indique une faible teneur en matière organique, car il s'agit d'un horizon qui, jusqu'alors, n'était pas travaillé. C'est important de prendre conscience de ce problème et de mettre en place des mesures préventives (diguettes, gestion des couverts, etc.)

Estimez-vous que l'analyse de votre HIRs a été utile ?

Oui, absolument. L'analyse a permis de révéler certaines hétérogénéités que je ne soupçonnais pas, comme une variation importante du pH dans certaines parcelles. On peut régler ce problème très rapidement par des apports variables de chaux, avec un effet direct sur le rendement.

Quels enseignements tirez-vous de ces analyses ?

Je conseille à tous les agriculteurs de commencer par leurs parcelles les plus hétérogènes. Cette hétérogénéité est facilement observable grâce à l'historique de la parcelle, aux images satellites, aux cartes de rendements, aux analyses de sol et aux connaissances de l'agriculteur.

Que penser des images satellites ?

C'est intéressant de valoriser ces nombreuses images historiques disponibles, mais il ne faut pas compter dessus à priori pour des utilisations en temps réel. Par exemple, en 2024, la couverture nuageuse a souvent impacté les mesures provenant des imageries satellitaires. En effet en condition nuageuse, aucune information ne parvient rendant les outils inutilisables.

Délais parfois inadaptés

En agriculture, le temps est une des ressources les plus précieuses. Dès lors, il est nécessaire que la mise en place des techniques d'agriculture de précision soit simple et rapide surtout lors des périodes des principaux travaux aux champs. Sinon, ces techniques risquent d'être abandonnées avant même d'être intégrées aux exploitations agricoles. Or les délais étaient parfois inadaptés entre la prise de donnée et la prescription agronomique. Ce fût notamment le cas pour la fertilisation azotée.

Structure du sol oubliée

L'imagerie satellitaire permet un constat des symptômes, mais pas de l'origine du ou des problèmes. C'est donc parfois une bonne base de travail pour permettre de délimiter des zones dans la parcelle.

Par contre, il ne faut pas oublier que la résolution des images satellites ne permet pas de voir certains éléments comme les dégâts de structure du sol. Or ce paramètre est essentiel pour comprendre le potentiel d'un sol. Il est primordial d'aller sur terrain pour pouvoir analyser les zones de tassement ou les zones de lissage du sol.



L'hétérogénéité des rendements au sein des parcelles

Le modèle mis en place par le CRA-W est une avancée pour prédire et expliquer l'hétérogénéité intraparcellaire, mais nécessite encore des améliorations pour gagner en précision. Ce projet a mis en avant les principales causes (facteurs explicatifs) de cette hétérogénéité.

Comment appliquer ces résultats sur mon exploitation ?

Il faut analyser ses parcelles à la recherche d'importantes hétérogénéités. Une fois ces zones identifiées, il devient nécessaire de quantifier cette variabilité intra-parcellaire. C'est seulement au terme de ces étapes qu'il devient nécessaire de réfléchir aux paramètres à ajuster.

Quels paramètres prioriser ?

Au terme de ce projet scientifique, les équipes du CRA-W ont réussi à prioriser les paramètres sur lesquels agir en fonction de leur impact sur la variabilité intraparcellaire du rendement.

Pour rappel, chaque parcelle possède un contexte qui lui est propre. Il est dès lors difficile d'appliquer aveuglément cette analyse à d'autres parcelles.

Paramètres influençant l'hétérogénéité des rendements :

-  1. **Texture du sol** (proportion de sable, limon et argile)
-  2. **pH du sol** (influence sur la disponibilité de tous les éléments nutritifs)
-  3. **Ratio carbone organique/argile** (indicateur de la structure et de la fertilité du sol)
-  4. **Capacité d'échange cationique (CEC)** (capacité du sol à retenir les éléments nutritifs)
-  5. **Teneur en éléments majeurs** : phosphore, potassium, calcium, magnésium
-  6. **Azote** : gestion plus complexe en raison de sa mobilité pouvant conduire au lessivage
-  7. **Éléments mineurs et itinéraire technique** : irrigation, densité de semis, traitements phytosanitaires
-  Moyen d'action possible
-  Pas de moyen d'action possible



Source :

Grenier, G. (2018). Agriculture de précision. France Agricole Eds.

D'autres fiches techniques

Cette fiche technique démontre l'importance de trois paramètres clés : le taux de MO, le taux d'argile et le pH du sol. La **fiche n°3** détaille une technique pour déterminer précisément ces paramètres à l'échelle d'une parcelle grâce au « scanning de sol ». Quant à l'hétérogénéité de l'humidité du sol, cet aspect est présenté dans la **fiche n°6** "Le pilotage de l'irrigation dans l'espace".



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