

Modulation de la fertilisation PK basée sur l'historique de la parcelle

Claire Aumond (inVivoAgrosolutions), Sébastien Benoist (CapSeine), Charles Duval (Défisol)

I) Contexte et Objectifs :

La taille des parcelles a sensiblement augmenté ces 50 dernières années du fait de l'augmentation de la taille des engins agricole, des remembrements successifs et de l'augmentation de la taille des exploitations agricoles. De ce fait, l'hétérogénéité des parcelles est de plus en plus importante. D'autre part, le contexte agricole actuel imposant des exigences environnementales de plus en plus élevées rend le maintien d'un revenu agricole durable de plus en plus compliqué. Ainsi, la fertilisation doit être calculée au plus juste des besoins. La question de la gestion intra-parcellaire des intrants devient donc aujourd'hui incontournable.

II) Méthode :

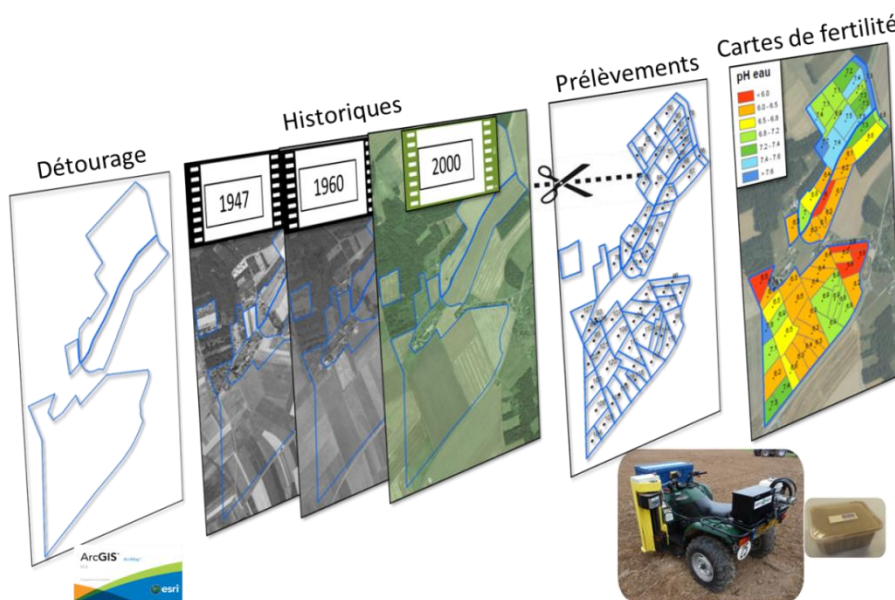
Nous allons ici aborder toutes les étapes aboutissant à un apport de phosphore et de potassium différencié à l'échelle intra-parcellaire au travers l'offre développée sur le terrain par Défisol.

a. Diagnostic de l'hétérogénéité

Plusieurs techniques de diagnostics de l'hétérogénéité intra-parcellaire existent aujourd'hui. Nous allons présenter ici la méthode développée par Défisol nommée Défi-multianalyse®.

A partir des historiques cadastraux et des cartes de rendement, si elles existent, des micro-parcelles homogènes sont définies. Au sein de chacune de ces micro-parcelles des prélèvements de

terre sont effectués à l'aide d'un couade et envoyés au laboratoire d'analyse de terre pour effectuer le diagnostic d'état de fertilité de chaque micro-parcelle. Une carte d'état de fertilité de la parcelle est alors réalisée.



Le processus est récapitulé dans la figure 1 ci-dessous.

Figure 1 : Elaboration de la carte de fertilité des sols

b. Calcul du conseil

Une fois le diagnostic d'état de fertilité de la parcelle réalisé, il faut réaliser le conseil au niveau de chaque micro-parcelle c'est-à-dire calculer la dose de phosphore et de potassium nécessaire de chaque micro-parcelle.

C'est l'outil de calcul Epiclès qui est utilisé. Dans cette partie, nous expliciterons en quoi cet outil est pertinent dans la gestion du conseil en intra-parcellaire.

Epiclès est particulièrement adapté au calcul du conseil en intra parcellaire car

- il intègre les données précises du profil pédologique,
- il réactualise le calcul en court de campagne après prise en compte des pratiques réelles de l'agriculteur et
- il permet de raisonner le conseil sur le long terme en visant une teneur souhaitable à atteindre fixe dépendant uniquement du profil pédologique

i. Les trois principes d'Epiclès

Le fonctionnement du moteur d'Epiclès est basé sur trois principes qui sont les suivants :

- L'état de fertilité du sol influence le capital de production de la parcelle
- A chaque état de fertilité correspond un optimum de fumure par culture
- Intégrer la variabilité des états de fertilité parcellaire au sein d'une même exploitation

Ainsi, le maintien d'un état de fertilité optimal lié à la culture et au type de sol est primordial.

L'objectif d'Epiclès est donc de positionner l'état de fertilité du sol en phosphore et en potassium au niveau optimal calculé en fonction du type de sol.

Le maintien de l'état de fertilité est une priorité pour différentes raisons :

- La différence de quantité d'éléments disponibles entre un sol bien pourvu et un sol pauvre est largement supérieure à celle apportée par la fumure de l'agriculteur.
- Un sol bien pourvu présente une répartition d'éléments minéraux homogène sur la couche labourée, alors qu'en sol pauvre, la fumure apportée est répartie de façon hétérogène.
- De plus, un sol bien pourvu apporte un confort de travail pour l'agriculteur : il n'est pas obligé de fertiliser chaque année pour éviter une perte économique.

Plusieurs essais longue durée ou des analyse de bases de données démontrent

- l'importance de l'état de fertilité pour maintenir les potentiels de rendement à l'optimum
- et l'impact des apports pour améliorer l'état de fertilité

ii. Un bon état de fertilité permet d'atteindre les meilleurs rendements

Par exemple, l'analyse de la base de données Epiclès de la coopérative Terrena met en évidence l'importance de maintenir l'état de fertilité sur les limons de l'Ouest. Epiclès, en plus d'être un outil de plan de fumure est aussi un outil permettant de stocker les données saisies et calculées.

Au sein de chaque base de données annuelle on distingue huit groupes de variables :

- Les données parcellaires, dont notamment
 - o Le nom de parcelle ;
 - o La commune de la parcelle ;
 - o Le type de sol et sa teneur en cailloux ;
 - o Le type de sous-sol et sa teneur en cailloux ;
 - o La profondeur du sol, et d'enracinement.

- Les données d'analyses de sol, dont notamment :
 - o La teneur en K₂O ;
 - o La teneur en P₂O₅ ;
 - o La teneur souhaitable calculée par le laboratoire d'analyse de terre
 - o La date de réalisation de l'analyse de terre ;
- Les variables décrivant les pratiques culturales, dont notamment :
 - o La culture mise en place l'année considérée ;
 - o L'objectif de rendement ;
 - o Le rendement réel de l'année.
- Les données de bilan de sortie du précédent ;
- Les variables décrivant le conseil de fertilisation, dont notamment :
 - o Le conseil en potassium ;
 - o Le conseil en phosphore ;
 - o Le conseil en azote.
- Les variables décrivant les apports de fertilisants effectués, dont notamment :
 - o L'azote minéral total apporté ;
 - o Le phosphore minéral total apporté ;
 - o Le potassium minéral total apporté ;
 - o Les apports organiques (dose, composition et date d'apport)

De cette façon, il est possible de relier un rendement obtenu à des pratiques spécifiques et au contexte pédoclimatique.

La base de données Terrena de 2005 à 2012 a été retenue pour mettre en lien le rendement réalisé par les agriculteurs en blé tendre avec les apports effectués et les caractéristiques pédoclimatiques de la parcelle.

		Interprétation de la teneur en K ₂ O				
		Très Faible	Faible	Correct	Elevée	Très Elevée
Interprétation de la teneur en P ₂ O ₅ Joret Hébert	Très Faible	1		3		
	Faible	1		3		
	Correct	2		4	Non traité	
	Elevée	2		4	5	
	Très Elevée	2		Non traité	5	

En fonction de l'état de fertilité des micro-parcelles en phosphore et en potassium des classes ont été créées comme indiqué dans la figure 2.

(Interprétation fonction des laboratoires d'analyse de terre et des coopératives)

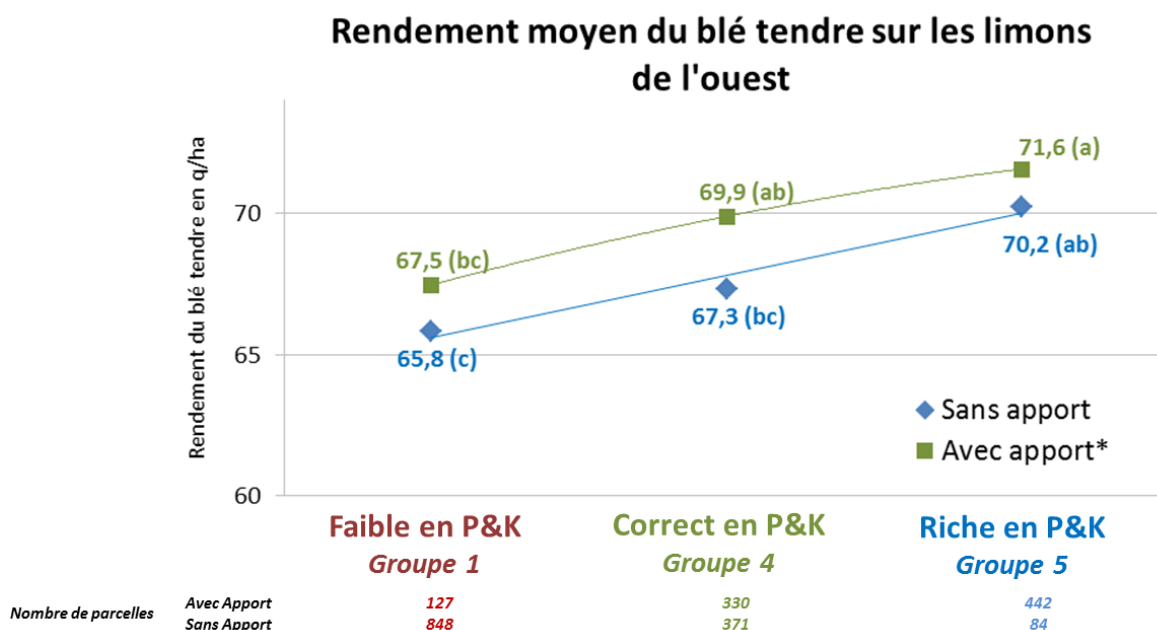
Figure 2 : Réalisation de classes d'état de fertilité en phosphore et en potassium

Les classes sont les suivantes :

- La classe 1 correspond à des teneurs en phosphore et en potassium faible et très faible.
- La classe 4 correspond à des teneurs en correcte et élevée en phosphore et en potassium.
- La classe 5 correspond aux teneurs en phosphore et en potassium élevées et très élevées.
- Les classes 2 et 3 sont des classes intermédiaires qui comprennent un des deux éléments (phosphore ou potassium) limitant. La classe 2 présente des teneurs en potassium faibles mais des teneurs en phosphore élevées alors que la classe 3 présente des teneurs en potassium riches mais des teneurs en phosphore faibles.

Les rendements moyen des parcelles de blé tendre ont été observés en fonction des classes définies en figure 3, uniquement sur les sols limoneux et sur les parcelles sans apports organiques l'année en cours.

On distingue les parcelles sans apport, c'est-à-dire que ce sont celles qui n'ont pas reçu d'engrais minéraux phosphoré ou potassique et les parcelles avec apports correspondant aux parcelles sur lesquels les apports en en phosphore et potassium sont au moins équivalents au conseil (avec une marge de 30 uN en moins possible).



D'abord, si on regarde uniquement les parcelles sans apport, on constate que les rendements des parcelles correctement pourvues sont les meilleurs et cela est statistiquement significatif (ANOVA). On gagne 4,4 q/ha en moyenne entre une parcelle présentant des teneurs en phosphore et potassium faibles et une parcelle présentant des teneurs riches en phosphore et potassium.

Si on compare ensuite les parcelles d'un même groupe de fertilité avec ou sans apport, on note qu'un apport de fertilisant permet d'augmenter les rendements même si cela n'est pas statistiquement significatif.

Enfin, on remarque qu'un sol déficitaire fertilisé fait moins bien qu'un sol à l'entretien non fertilisé (non statistiquement significatif). On gagne 2,8 q/ha en moyenne entre une parcelle dépourvue en phosphore et potassium fertilisée et une parcelle présentant des teneurs en phosphore et potassium élevées et non fertilisée.

iii. Un apport de fertilisants permet d'améliorer l'état de fertilité

L'essai longue durée mené par Terrena depuis 17 ans à la Daguinière dans le Maine-et-Loire est un autre exemple illustrant également l'importance de maintenir l'état de fertilité d'une parcelle.

Cet essai a été mis en place sur un sol argilo-limoneux profond très carencé en phosphore et potassium. Il présente 4 répétitions. Le protocole suivi est le suivant :

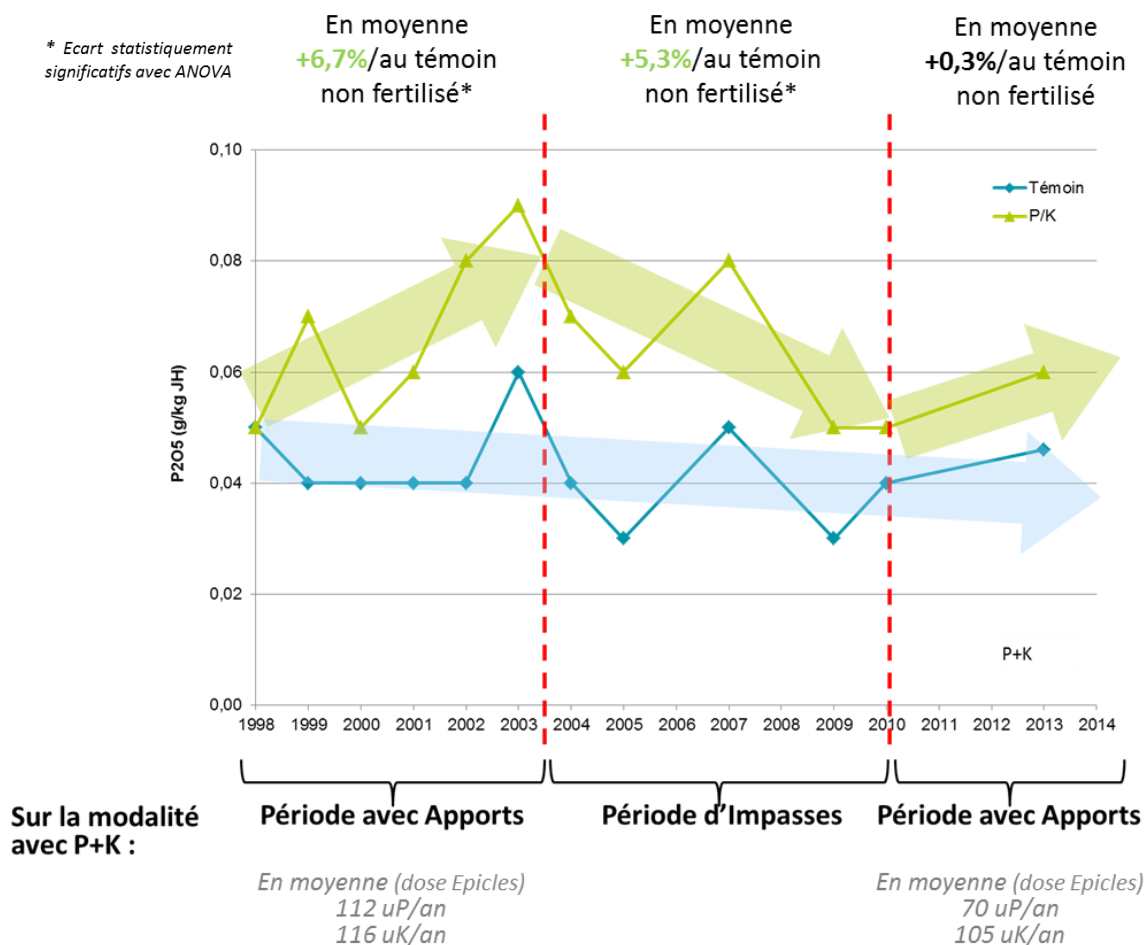
- Modalité témoin sans apport de phosphore ni de potassium
- Modalité avec apport de phosphore et potassium à la dose X calculée par Epiclès raisonné

Des apports ont ainsi été faits les 6 premières années de l'essai (1998 à 2003). Ensuite, pendant 6 ans, aucun apport n'a été effectué (2004 à 2009). Enfin, à partir de 2010, des apports ont été réalisés selon la dose conseillée par Epiclès raisonné.

Des analyses de terre ont été effectuées tous les ans les premières années puis tous les 2 ou 3 ans les années suivantes pour suivre l'évolution de l'état de fertilité de la parcelle.

L'objectif de l'essai est de voir quels sont les effets du passé récent de fertilisation et quelles sont les conséquences des impasses.

* Ecart statistiquement significatifs avec ANOVA



L'évolution de l'état de fertilité du sol en phosphore est illustrée sur le graphique ci-dessus. Pendant la période d'apport de 1998 à 2003, on note que les apports permettant d'enrichir le sol en phosphore. Le témoin sans apport a quant à lui une tendance à l'appauvrissement. Cette augmentation de la teneur en phosphore du sol s'est accompagnée d'un gain de rendement par rapport au témoin de 6,7 % en moyenne sur les cultures successives de Tournesol, Pois, Blé Tendre, Mais Grain, Pois et Colza. Ce gain de rendement moyen est statistiquement significatif.

Pendant la période d'impasse, la teneur du sol en phosphore dans la parcelle fertilisée pendant 6 ans selon le conseil Epiclès mets 6 ans pour revenir à son état initial. Pendant cette période de transition, les gains de rendement sur la parcelle fertilisée sont toujours notables d'une moyenne de 5,3 % (statistiquement significatif) sur les cultures successives Blé Tendre, Pois, Blé Tendre, Colza, Blé Tendre et Blé Tendre.

Ainsi, on établit un lien entre état de fertilité et rendement.

iv. Etapas du calcul Epiclès

Les différentes étapes du conseil Epiclès sont les suivantes :

- Réactualisation de l'état de fertilité de la parcelle en considérant les caractéristiques précises définies lors de la saisie du détail du profil pédologique ainsi que les pratiques de l'agriculteur. C'est le solde Entrées – Sorties qui est pris en compte
- Le calcul de la fumure totale à apporter en fonction des besoins de la culture et du sol et à partir de la teneur du sol réactualisée
- L'intégration des apports organiques
- La différence entre la fumure totale à apporter et l'efficacité des apports organiques indique le complément de phosphore ou potassium minéral à apporter.

Nous allons détailler par la suite le calcul de :

- La réactualisation de l'état de fertilité de la parcelle
- Le calcul de la fumure

v. Le calcul de la réactualisation de l'état de fertilité

Le calcul de réactualisation de la teneur se fait de la façon suivante :

La teneur réactualisée correspond au la teneur mesurée lors de l'analyse de terre additionné au solde de fumure depuis l'intégration de l'analyse de terre ajusté en fonction du poids de terre (Figure 3).

$$T \text{ réact.} = T \text{ analyse} + [\text{Solde} / \text{PT}]$$

- **T analyse** : Teneur du sol mesurée par l'analyse
- **Solde** : Solde de fumure depuis la première année d'Epiclès
- **PT** : Poids de terre fine par hectare (Type de sol, Charge en cailloux du sol, Profondeur du sol)

Figure 3 : Calcul de la teneur du sol réactualisée

Le calcul du poids de terre est important car il permet de convertir les g/kg de terre mesurées par l'analyse de terre à des kg/ha au niveau de la parcelle d'un élément minéral. En effet, dans un hectare, le poids de terre peut être très variable en fonction du taux de cailloux, de la densité apparente du type de sol et de la profondeur du sol. C'est ce qu'illustre la figure 4. En fonction de la teneur mesurée par le laboratoire d'analyse de terre, l'interprétation de la quantité totale de l'élément sera différente que l'on soit sur une parcelle avec un poids de terre élevé ou sur une

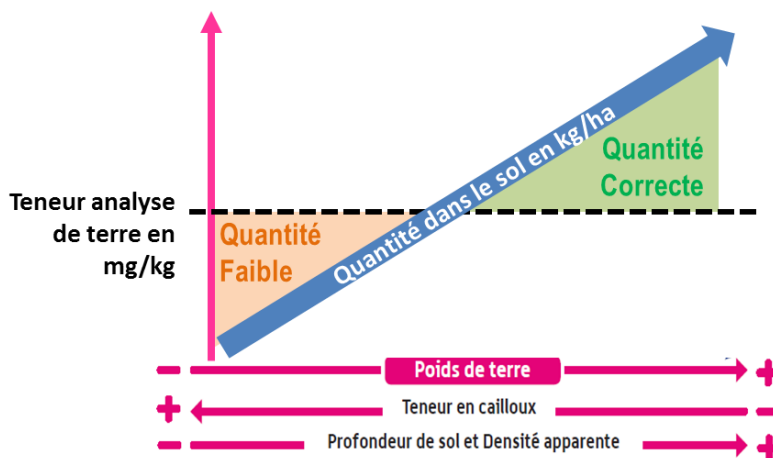


Figure 4 : Intégration du poids terre pour convertir des g/kg de terre issue de l'analyse de terre en kg/ha de la parcelle

parcelle avec un poids de terre faible. Un même teneur mesurée peut être interprétée comme élevée dans un sol avec fort poids de terre (c'est-à-dire beaucoup de terre donc beaucoup d'élément au total disponible dans la parcelle) alors qu'elle peut être interprétée comme faible dans un sol avec un faible poids de terre (c'est-à-dire peu de terre disponible donc au total peu d'éléments minéral disponible). C'est pour cela que la description détaillée du profil

pédologique est indispensable dans Epiclès et cela est possible de le faire en saisissant les données d'entrées précises.

Le calcul du solde de fumure depuis l'année de prise en compte de l'analyse de terre se fait à partir des apports réalisés et des exportations engendrées par la culture, ceci pouvant être réactualisé à la fin de la campagne pour ajuster le solde. Ceci est présenté dans la figure 5.

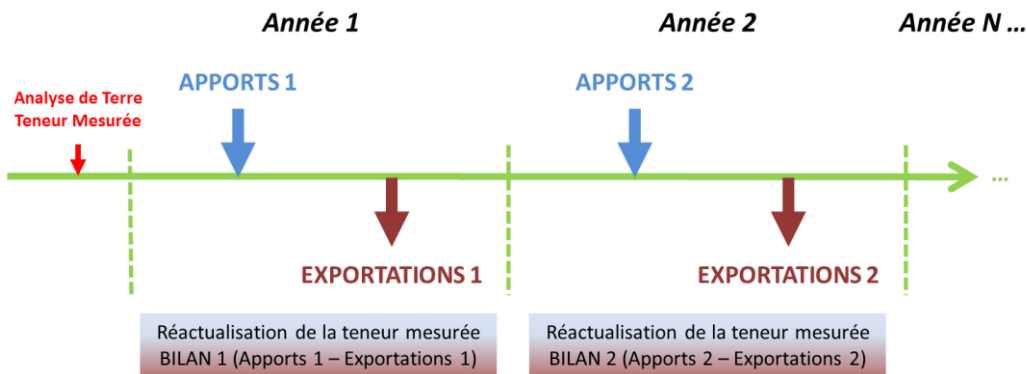


Figure 5 : Calcul du solde de fumure au fur et à mesure des années à partir des pratiques réelles de l'agriculteur

vi. Le calcul de la fumure totale à apporter

Ce calcul se fait à partir du calcul précédent car pour faire le calcul du conseil, on va comparer la teneur réactualisée à la teneur souhaitable.

Le calcul de la fumure totale à apporter se détermine en fonction :

- De l'exportation de la culture, fonction
 - o Du rendement
 - o Du devenir des résidus de récolte
- Des pertes du sol à l'entretien fonction (voir la figure 6) :
 - o Du Pouvoir Fixateur
 - o Du Lessivage
 - o De la Fixation
- Du niveau de richesse du sol (voir la figure 7) :
 - o État de fertilité faible : Fumure de Redressement
 - o État de fertilité normal : Avance ou retard de fumure
 - o État de fertilité élevé : Décapitalisation

Le calcul des pertes du sol à l'entretien dépend de l'élément. L'essai d'Axereal mené dans les années 80 permet de chiffrer les pertes à l'entretien du phosphore et du potassium dans un sol limoneux sur calcaire de Beauce.

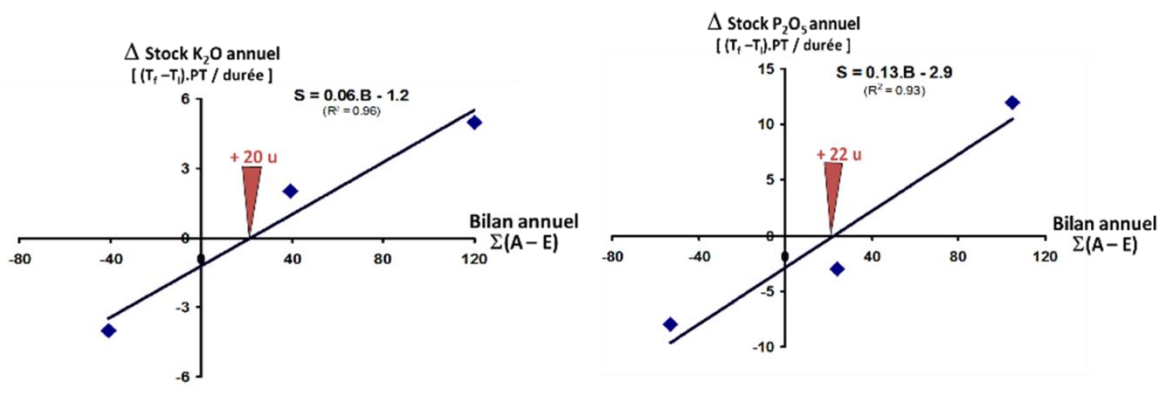


Figure 6 : Calcul des pertes annuelles de phosphore et de potassium

La variation du stock annuel en K_2O et P_2O_5 a été mise en relation avec le bilan annuel. Le calcul du stock annuel correspond à l'écart de teneur mesurée entre l'état initial et l'état final converti en kg/ha donc intégrant le poids de terre. Le bilan annuel correspond aux entrées-sorties.

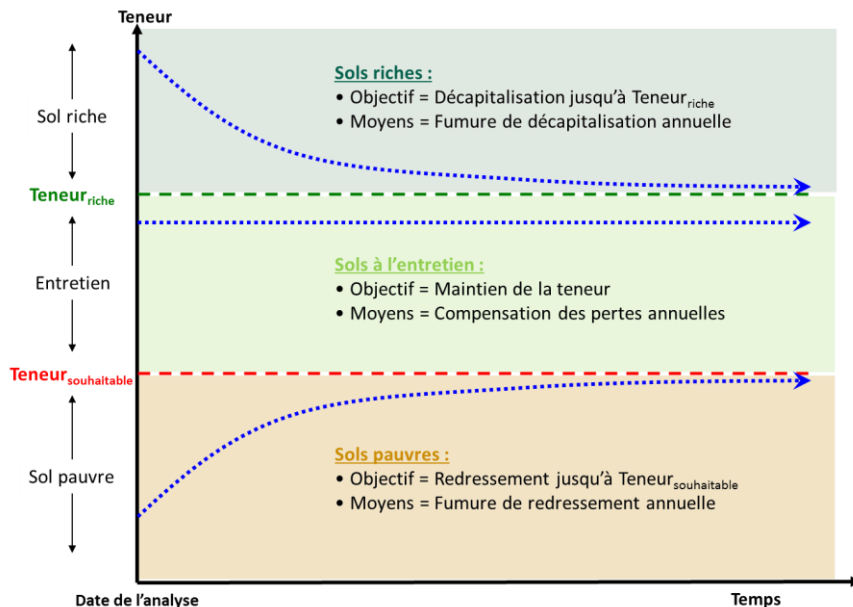
De cette façon, on met en évidence que pour maintenir la teneur du sol à son niveau initial, il faut apporter 20 u de K_2O de plus que les exportations et 22 u de P_2O_5 de plus que les exportations.

Le niveau de richesse du sol résulte de la comparaison de la teneur réactualisée avec la teneur souhaitable et la teneur riche (figure 7).

Pour les sols pauvres, c'est-à-dire que la teneur mesurée en phosphore ou potassium est inférieure à la teneur souhaitable calculée, l'objectif sur plusieurs années d'Epiclès est de tendre vers la teneur souhaitable en conseillant des fumures de redressements annuelles de façon successives.

Pour les sols riches, c'est-à-dire que la teneur mesurée est supérieure à la teneur riche calculée à partir de la teneur souhaitable, l'objectif sur plusieurs années d'Epiclès est de tendre vers la teneur riche en conseillant des fumures de décapitalisation annuelles de façon successives.

Pour les sols à l'entretien, c'est-à-dire que la teneur mesurée est située entre la teneur souhaitable et la teneur riche, l'objectif sur plusieurs années d'Epiclès est de maintenir cette teneur au cours du temps par une compensation des pertes annuelles.



Ainsi, le calcul des fumures de décapitalisation, redressement ou de compensation des pertes annuelles sont fonction de :

- La classe d'exigence de la culture à venir
- L'écart entre la "teneur réactualisée du sol" et la teneur souhaitable
- Le pouvoir fixateur
- Le nombre d'années sans fumure (0, 1, 2 et plus)

Figure 7 : Stratégie de calcul des doses de phosphore et potassium d'Epiclès

Le calcul de la teneur souhaitable du sol est celui retenu par les différents laboratoires d'analyses de terre travaillant avec les différentes coopératives tandis que la teneur riche est calculée à partir de la teneur souhaitable donc dépendant du profil pédologique de la parcelle.

vii. Validation du calage de la dose calculée en phosphore et en potassium par Epiclès

Plusieurs essais réalisés au sein du Pool Fertil¹ testent la dose calculée par le logiciel Epiclès et la compare avec des doses réduites et des doses renforcées

L'essai Terrena mis en place en 2014 à Prinçay dans le Vienne compare plusieurs modalités présentées dans le tableau 1.

¹ Enceinte regroupant un réseau de coopératives souhaitant mutualiser leurs expérimentations

Tableau 1 : Protocole de l'essai Terrena de prinçay (86)

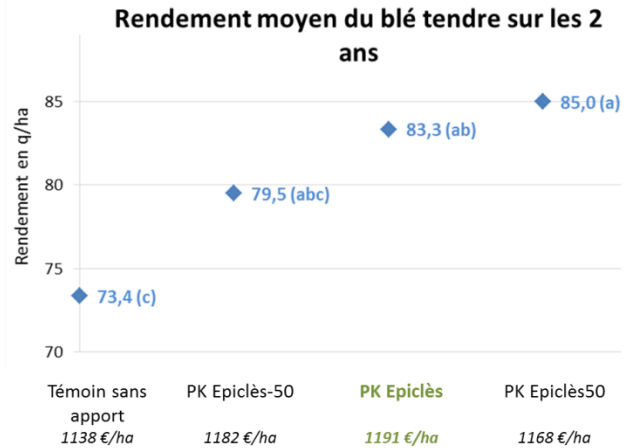
Modalité	Détails
Témoin	
PK Epiclès - 50	Application en plein au tallage
PK Epiclès	Application en plein au tallage
PK Epiclès + 50	Application en plein au tallage

initiale est élevée

La courbe de réponse de l'essai moyenne sur les deux années en fonction de la dose de phosphore et de potassium apportée est la suivante :

Le rendement optimal est obtenu avec une dose renforcée tandis que la dose optimale est la dose X car c'est celle qui est la plus rentable.

Sur les deux années 2014 et 2015, a été cultivé du blé tendre. La parcelle présente un sol calcaire sur craie avec une teneur en matière organique moyenne. La teneur en phosphore initiale est très faible tandis que la teneur en potassium

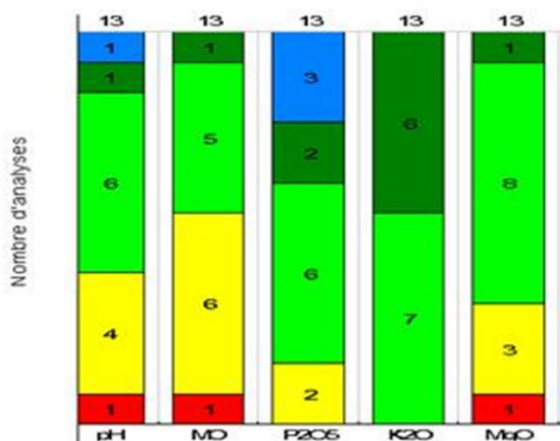


c. Un exemple de modulation intra-parcellaire chez CapSeine

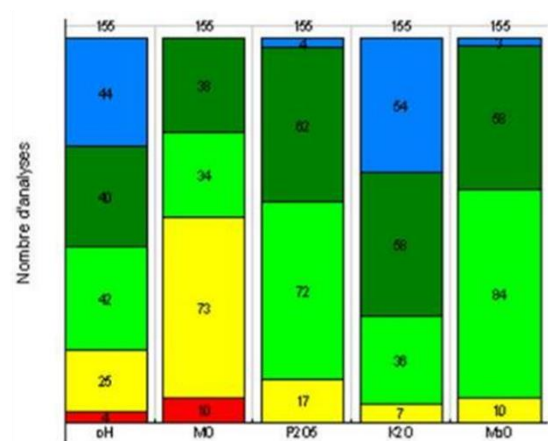
L'exploitation étudiée est une exploitation du sud de l'Eure de 130 ha en grandes cultures. L'assolement est le suivant : Blé : 68,3%, Colza : 15,5%, Lin : 15%, Prairie : 1,2%. Il s'agit d'un adhérent de CapSeine.

Les profils de fertilité de l'exploitation ont été comparés avant et après le diagnostic en intra-parcellaire. Le profil de fertilité comptabilise le nombre d'analyses de terre de l'exploitation présentant des teneurs très faible, faible, correcte, élevée ou très élevée en fonction de chaque élément.

Analyses de terre AVANT prise en compte du diagnostic intra-parcellaire



Analyses de terre APRES prise en compte du diagnostic intra-parcellaire



On remarque ici que les analyses de terre faites à l'échelle de la parcelle entière ne reflètent pas ce que peut donner des analyses de terre faites à l'échelle de la micro-parcelle. En effet, initialement, les parcelles étaient jugées plus dépourvues que ce qui a pu être diagnostiqué avec un maillage plus fin des analyses de terre. Par exemple en potassium, avant la prise en compte du diagnostic intra-

parcellaire on constatait que 7 parcelles sur 13 présentaient des teneurs correctes (soit 54%) et que 6 parcelles présentaient des teneurs élevées (soit 46%). Après le diagnostic intra parcellaire, le nombre des analyses de terre a été **multiplié par 12** et on note finalement que 35% des parcelles présentent des teneurs en potassium très élevées, 37% élevées, 23% correctes et 5% faibles. Les conclusions sont les mêmes pour les autres éléments.

Face à ce diagnostic plus fin de l'état de fertilité global de l'exploitation, les calculs de conseils en potassium et en phosphore sont ajustés à la baisse (l'état de fertilité global de la parcelle étant sous-estimé). Cela a pour conséquence la baisse de la commande d'engrais de l'ordre de **17 €/ha/an**. Ceci est détaillé dans la figure 8.



Une économie de **2177 €/an** sur les commandes d'engrais

Figure 8 : Comparaison des apports d'engrais avant et après le diagnostic intra-parcellaire

D'autre part, on note que l'état de fertilité du phosphore a aussi un impact sur la dose d'azote conseillée par Epiclès. En effet, un écart de biomasse de 1kg/ha entre une zone correctement pourvue et une zone déficitaire a été observé : une économie de 50 uN pour la zone présentant la forte biomasse est donc possible.

III) Conclusions et Perspectives

Epiclès est un outil pertinent pour la modulation intra-parcellaire car il permet de :

- Prendre en compte les caractéristiques du profil pédologique
- Avoir un raisonnement pluriannuel pour atteindre une teneur seuil
- Actualiser les conseils en fonction des pratiques réelles de l'agriculteur
- Calcul un conseil N en parallèle qui prend en compte les effets PK

D'autre part, notons que la mise en place de la modulation est possible grâce aux cartes de modulation qui peuvent être intégrées directement dans les boîtiers et l'épandeur suit les ordres de variation de doses.

Cette offre ayant débutée dans les années 2005, la prise de recul est maintenant suffisante pour estimer le temps de validité du conseil intra-parcellaire suivant cette procédure. Au bout de 10 ans, il sera nécessaire d'évaluer l'évolution de l'état de fertilité. Des analyses de terre seront positionnées sur un maillage moins fin que le maillage initial ; les carences ayant été corrigées sur ce laps de temps de 10 ans.

