



Comparaison des approches du raisonnement
des fertilisations N-P-K
parmi des pays voisins de la France

Date : Juillet 2021

Auteurs :

Lionel Jordan-Meille	<i>Bordeaux Sciences Agro</i>
Pascal Denoroy	<i>INRAE</i>
Marie Carré	<i>Comifer</i>

*Etude rédigée dans le cadre de la convention MAA-COMIFER 2020-2021, action
« parangonnage des méthodes de raisonnement en matière de fertilisation azote, phosphore,
potassium dans quelques pays européens »*

COMIFER
Immeuble Le Diamant A
14 rue de la République
92800 PUTEAUX - France

Table des matières

1)	Contexte et objectifs de l'étude de parangonnage	3
2)	Méthode.....	6
3)	Résultats « bruts » à l'échelle de chaque pays	8
3.1)	Allemagne	8
3.2)	Belgique.....	9
3.3)	Espagne	10
3.4)	Irlande	12
3.5)	Italie.....	14
3.6)	Luxembourg	16
3.7)	Pays-Bas	17
3.8)	Royaume Uni.....	19
3.9)	Suisse.....	20
4)	Synthèse.....	22
4.1)	Raisonnement de la fertilisation N	22
4.2)	Raisonnement de la fertilisation P K	24
5.	Suites à donner à ce travail	29

1) Contexte et objectifs de l'étude de parangonnage

Pourquoi ce travail ?

Le raisonnement de la fertilisation est le fruit d'un compromis entre souhait de production en quantité et qualité élevées, dans des conditions économiques satisfaisantes pour les producteurs, et le souci de protection de l'environnement, avec essentiellement la maîtrise des risques de transfert des éléments fertilisants vers l'eau et aussi vers l'atmosphère dans le cas de l'azote.

Cette problématique est largement partagée entre les pays européens, en particulier parmi les voisins directs de la France. Cependant, si les connaissances et les concepts circulent largement dans la sphère scientifique, par le biais de la littérature agronomique internationale, la définition technique des bonnes pratiques et les supports d'information pour leur mise en œuvre sont traités à échelle nationale, en langue nationale, et donc ne sont pas partagés entre pays, même voisins.

Si le monde académique se rencontre dans des congrès internationaux, les praticiens de la fertilisation issus de pays différents n'ont pas vraiment d'espace d'échange international et donc s'ignorent entre eux. Ceci malgré les efforts d'ouverture à des participants étrangers des Rencontres Comifer-Gemas ; la langue reste généralement un obstacle fort aux échanges, en sus de contextes réglementaires différents conduisant à des sensibilités différentes aux diverses questions possibles.

Au niveau européen, nous assistons à une montée en charge des réglementations européennes touchant l'agriculture et la protection de l'environnement, avec une tendance à l'intégration plus forte des préconisations pour les bonnes pratiques agricoles. Dans ce contexte, il est utile de disposer d'une vision claire de la situation.

Cette connaissance préalable sera nécessaire pour anticiper des projets de règlement ou d'outil qui pourraient devenir d'usage obligatoire, comme le projet FAST. Le risque serait grand en effet que les acteurs du conseil agricole en France (laboratoires de service, conseillers publics ou privés) se trouvent pris au dépourvu, et fortement concurrencés par des intervenant externes, si des outils européens étaient mis en place sans que la France l'ait anticipé. N'oublions pas que chaque pays a des pratiques propres, plus ou moins spécifiques, ne serait-ce qu'en termes de méthode d'analyse de terre, puis en termes d'interprétation (concepts, paramétrage) de ces analyses.

Dans l'idéal, la connaissance de la situation recouvre la connaissance des préconisations et aussi l'évaluation de leur mise en œuvre effective dans le monde agricole. Ce dernier point est particulièrement ardu à traiter car il nécessiterait de traiter de façon homogène des sources d'information très variées, hétérogènes et d'accessibilité difficile.

Une première étape est donc de faire le point des recommandations de bonnes pratiques de fertilisation. Sans oublier que les bonnes pratiques préconisées le sont dans un cadre réglementaire qui peut sensiblement varier d'un pays à l'autre.

Historique

Le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA) a soutenu depuis plusieurs années la collecte par le Comifer d'informations sur les préconisations de fertilisation hors de France. Le Comifer a pu ainsi commencer à formaliser et remplir une grille d'analyse des méthodes de raisonnement publiées par divers pays européens (cf. les Comptes Rendus des conventions passées MAA-Comifer). La collecte des méthodes issues des pays « influents » de l'UE (Pays-Bas, Allemagne, ...) est une stratégie

d'anticipation de changements futurs potentiels qui pourraient s'imposer à l'ensemble des pays de l'Union.

En 2020, le lancement par l'European Joint Programme Soil (EJP_Soil <https://ejpsoil.eu/>) d'une enquête sur les principes de la fertilisation à travers la Communauté Européenne (« Stocktake study and recommendations for harmonizing methodologies for fertilization guidelines across regions »), à laquelle le Comifer a participé, a permis d'élargir la liste de nos contacts et d'actualiser les sources d'informations.

Le travail de l'EJP-Soil pouvant déboucher sur des projets scientifiques à échelle européenne, il nous semble opportun de faire maintenant un point de nos connaissances pour anticiper un possible appel à projet et y répondre dans les meilleures conditions, avec le soutien des pouvoirs publics et des parties prenantes de la filière.

Comparer quoi ?

Il s'agit d'inventorier et d'identifier, à travers l'analyse des documents de référence produits dans chaque pays, et afin de les comparer ultérieurement :

- les concepts sur lesquels se basent les règles de raisonnement de la fertilisation ;
- les indicateurs (analytiques ou autres) qui permettent d'évaluer ou quantifier les paramètres utilisés lors du raisonnement ;
- les démarches de diagnostic et préconisation, basées sur des mesures physiques ou chimiques objectives ou sur d'autres bases ;
- le paramétrage du traitement des informations, et les sources de ces paramètres.

Comparer, pour quoi faire ?

L'étude va s'appuyer sur l'analyse (après traduction si nécessaire) des documents nationaux expliquant le raisonnement, documents mis à disposition des professionnels pour l'établissement des prévisions et plans de fertilisation. Les méthodes de raisonnement de chaque pays sont analysées et comparées aux nôtres dans le but de :

- positionner nos méthodes globales de raisonnement ; relativement à celles de nos voisins (pour rester dans des systèmes et conditions de production assez comparables)
- positionner les préconisations « officielles », faute de pouvoir comparer sur les mêmes critères les pratiques réelles, à conditions agricoles équivalentes. Privilégient-elles davantage la production ou l'environnement ? quel poids relatif donnent-elles à chaque préoccupation ? avec quelles justifications ?
- déceler l'innovation au niveau des méthodes chimiques, des algorithmes, des outils de pilotage, etc
...
- connaître ce qui se fait dans le but de mieux anticiper les futures réglementations, être force de propositions si possible sur nos critères...

Pour le Comifer, il s'agit aussi de partager et enrichir les expériences et les référentiels, pour progresser d'abord à échelle de la France, mais aussi éviter l'isolement et s'impliquer pour faire à échelle internationale ce que le Comifer fait à échelle nationale : espace de rencontres, de confrontation des idées et des expériences et d'amélioration de l'expérience et de l'expertise collective.

Périmètre de l'étude et pays ciblés

Sur le plan technique, on a étudié la fertilisation concernant les éléments azote (N), phosphore (P) et potassium (K). Ceci inclut les principes du raisonnement du diagnostic, les mesures d'extractions chimiques, le raisonnement des doses de fertilisants et les outils de pilotage de l'état nutritionnel des cultures dès lors qu'il s'agit d'outils opérationnels.

Sont exclus de l'étude les méthodes d'épandage, les contraintes réglementaires (dates d'interdiction, distances d'épandage ...) si elles se justifient par des contraintes très locales n'ayant pas leur équivalent dans d'autres pays, France en particulier. *A contrario*, cette étude ne traite pas du statut acido-basique ou organique, des oligoéléments ou des critères de fertilité biologique.

Sur le plan géographique, l'étude se limite aux pays frontaliers (ou presque) de la France métropolitaine, afin de rester dans des situations assez proches des nôtres (cultures, systèmes de production, contexte pédoclimatique, contexte social et réglementaire, ...) permettant des comparaisons qui aient du sens et nous apportent des possibilités de réflexions et de transposition à notre situation. Ce sont aussi des pays dont la traduction des documents n'existant qu'en langue nationale est encore assez aisée.

Nous ne considérons pour le moment que la France métropolitaine car d'une part, le Comifer ne travaille pas Outre-Mer, et parce que cela nous conduirait alors à devoir prendre une trop large variété de contextes (tropicaux, équatoriaux, ...).

Les pays concernés sont donc à ce jour : Allemagne, Belgique, Espagne, Irlande, Italie, Luxembourg, Pays-Bas, Royaume Uni, Suisse.

2) Méthode

Sources d'informations

L'accès aux informations à l'échelle de chaque pays a reposé sur la recherche de personnes-ressources et de documents de références sur les méthodes de fertilisation employées dans ces pays. La liste des référents s'est élaborée grâce aux travaux antérieurs menés sur le même sujet (Jordan-Meille *et al.* 2010), des contacts personnels, et, à partir de 2020, de la liste des scientifiques impliqués dans l'EJP Soil, livrable 2.4.5 (« Stocktake study and recommendations for harmonizing methodologies for fertilization guidelines »). Les documents, décrivant les méthodes, ont été obtenus par la collecte de littérature grise (et sa traduction éventuelle avec le logiciel Deep_L, accompagnée d'une relecture pour corriger les erreurs de traduction), parallèlement à de la recherche bibliographique scientifique plus classique, et souvent plus transversale.

L'inventaire des documents techniques collectés ainsi que des personnes ressources pour chaque pays figurent en première partie des résultats de chaque pays. L'ensemble de ces documents (originaux et traductions) sont accessibles sur demande.

Organisation de l'information

Une grille d'analyse *a priori* a été construite pour y reporter de façon normalisée les informations collectées dans les documents nationaux présentant ou vulgarisant les raisonnements. La construction de cette grille s'est faite de manière itérative, s'enrichissant au fur et à mesure de nouvelles informations collectées dans chaque pays. Les grilles N d'une part, P et K d'autre part, ont été construites de manière indépendante, tant les méthodes de raisonnement possèdent de particularités. Les grilles et leur contenu sont présentés en **annexe 1** de ce document.

La grille N se décompose selon les rubriques suivantes :

- Principes généraux de la méthode de raisonnement
- Listes des critères majeurs pris en compte (e.g. objectifs de rendement, objectifs environnementaux, ...)
- Définition des variables de l'équation du bilan quand elle est mise en œuvre, paramètres pris en compte, estimation des paramètres (données de l'exploitation, mesure, table de références, modèle, données météorologiques...)
- Listes des mesures réalisées dans le cadre de la méthode (analyses de terre, analyses des matières fertilisantes, ...)

La grille K se décompose en 5 rubriques principales :

- Principes généraux de la méthode de raisonnement : est-elle fondée sur le calcul d'un bilan, des mesures-plafond, une approche par diagnostic, etc. ... ?
- Organismes impliqués dans l'élaboration des méthodes
- Méthodes de diagnostic
- Méthodes d'élaboration des recommandations
- Applications et utilisations pratiques sur le terrain

La grille P reprend les catégories de celles dédiées au K, mais on y a ajouté une rubrique sur les contraintes réglementaires ou liées à des mesures agro-environnementales.

Définitions

Bilan prévisionnel : méthode permettant d'ajuster les apports d'engrais minéraux ou organiques aux besoins de la culture pour atteindre un objectif de production donné en prenant en compte les autres fournitures d'azote par le sol.

Dose plafond : Une dose plafond est une dose que l'on ne peut en aucun cas dépasser. Elle laisse le libre choix d'épandre des doses plus faibles.

Dose pivot : Une dose pivot est une dose à partir de laquelle on peut faire des ajustements en plus ou en moins. Elle exige donc des règles d'ajustement, dose X +ou - Y, diminuer ou augmenter de Y si telle condition (climat, variété, sol ...). Une dose pivot s'accompagne de règles d'ajustement.

PRO : produit résiduaire organique

Lixiviation : Perte d'azote sous forme d'azote nitrique à la suite du lessivage

Volatilisation : Perte gazeuse d'azote sous forme d'azote ammoniacal

Description du contenu des annexes

L'annexe 2 détaille pour chaque élément (N, P et K, respectivement), et par pays, le contenu technique des méthodes nationales : tables, références, valeurs-seuil, teneurs en minéraux des plantes, exemples d'applications numériques, etc. ...

3) Résultats « bruts » à l'échelle de chaque pays

3.1) Allemagne

Contacts EJP : Anna Jacobs (Institut Johann Heinrich von Thunen) anna.jacobs@thuenen.de

Autres contacts : Klaus Dittert (Université de Göttingen) klaus.dittert@agr.uni-goettingen.de

Guides de référence : VDLUFA (1997) ; VDLFUA _FR (1997) ; Düngeverordnung - DüV (2020); Düngeverordnung – DüV_FR (2020)

A. Azote

La fertilisation N est menée en Allemagne selon deux objectifs, à savoir apporter la dose nécessaire pour permettre le rendement optimum de la culture et limiter les pertes à l'échelle de l'exploitation.

Pour définir la dose d'N à apporter, l'agriculteur doit déterminer la quantité prélevée par la culture, puis retrancher l'N minéral du sol, l'N minéral et minéralisable des matières organiques du sol, l'N des arrières-effet des PRO, ainsi que l'N laissé par les cultures intermédiaires. Tous ces postes font l'objet de tableaux de références à l'échelle des régions. En ce qui concerne l'arrière-effet des produits résiduels organiques, l'agriculteur doit comptabiliser 10% de l'N apporté lors de la campagne précédente. L'N minéral apporté est considéré disponible à 100%. Les éventuelles pertes sont prises en compte lors d'un second calcul à l'échelle de l'exploitation agricole.

A la fin de chaque année, l'agriculteur doit faire un bilan des apports et de exportations d'N à l'échelle de son exploitation. Par exemple, pour les entrées d'N sur l'exploitation, celui contenu dans les engrais minéraux achetés, les PRO achetés, l'alimentation du bétail est prise en compte ; pour les exports, sont pris en compte les rendements de cultures vendues et non auto-consommées, les exports de PRO, les récoltes, les animaux vendus et leurs produits (lait ...), etc. Ce bilan permet donc de comptabiliser les pertes d'N à l'échelle de l'exploitation agricole, qui ne doivent pas dépasser 170 Kg N.ha⁻¹ sous peine de fortes amendes. Cette limitation est aujourd'hui la même pour toutes les exploitations, et peut être amenée à évoluer.

B. Phosphore et potassium

Le principe du raisonnement de la fertilisation P et K suit un diagnostic basé sur une analyse de terre, suivi d'une recommandation calculée en fonction de l'écart à des valeurs-seuils. Un extractant unique (Calcium Acetate Lactate, pH 4.1) détermine les teneurs en P et K biodisponibles. Cinq classes de fertilité croissante sont définies (A à E, exceptionnellement F en Basse-Saxe, très concernée par les apports de MO). Pour P, les teneurs-seuils sont essentiellement calculées en fonction de la texture, notamment teneur en argile. La teneur en matière organique n'est discriminante qu'autour d'un seuil de 8%.

En deçà de la classe C, médiane (qui définit une « teneur-seuil »), des apports supérieurs aux exportations (respectivement 2 et 1.5 fois pour classes A et B) sont préconisés. Préconisation pour la Classe D : 0.5 fois, puis impasses pour les classes D et E. A noter la prise en compte des précipitations sur ces seuils, avec une correction à la hausse pour les situations séchantes. Dans le seul cas de la betterave, il est conseillé de regrouper les apports calculés à l'échelle de la rotation juste avant son semis.

K n'étant pas soumis à réglementation, les données relatives aux seuils n'ont pas pu être récupérées. Les recherches de références sont à poursuivre.

3.2) Belgique

Contacts EJP : Pas de contact

Autres contacts : Gilles Colinet (Univ Liège) gilles.colinet@uliege.be Valérie Génot (REQUASUD) genot.v@fsagx.ac.be

Guides de référence : REQUASUD, un conseil de fumure raisonné - Le cas du phosphore. Génot *et al* 2011 (Wallonie) ; Le programme de gestion durable l'azote en région wallonne (1er programme d'action, 2002-2006), C. Vandenbergue et al, 2006

A. Azote

En Belgique (Wallonie et Flandre), la fertilisation N se base sur des doses-plafonds définies pour chaque culture. Ces doses prennent en compte la nature des sols (sablonneux ou non sablonneux), les besoins des cultures (prélèvements totaux), le N minéral du sol, la minéralisation de l'humus, la minéralisation des résidus, la minéralisation des amendements et l'N minéral des amendements.

La prise en compte de critères environnementaux se base sur une stratégie de résultats, et notamment sur la mesure par analyse de terre de reliquats post-récolte dans les exploitations qui, pour être acceptés, doivent être inférieurs à des références, fixées annuellement. Concrètement, l'administration contrôle les valeurs en nitrates dans 3 parcelles de l'exploitation. Les reliquats sont mesurés sur un horizon 0-90 cm et sont comparés à des reliquats mesurés dans un réseau de référence.

B. Phosphore et potassium

La fertilisation P est basée sur la comparaison entre le résultat d'une analyse du sol avec des seuils. Les valeurs sont dépendantes du pH et de la texture du sol. Pour la mesure de la disponibilité de P dans les sols, la méthode de Lakanen et Erviö (1971) (extraction à l'acétate d'ammonium 0.5N et EDTA 0.02M à pH 4.65) est utilisée en Wallonie ; la méthode à l'extraction AL (Acétate-Lactate) est utilisée en Flandres. Les deux régions se réfèrent à trois classes de fertilité, mais ces dernières sont différentes. Les deux régions appliquent des coefficients multiplicateurs selon les classes de fertilité, mais pour les classes de faible disponibilité, il est fixé une dose plafond en Flandre.

Suite à l'établissement du diagnostic, il est effectué un calcul des besoins et de la dose à apporter. D'un côté, les exportations concernent le P sortant de la parcelle, auxquelles s'ajoutent des quantités jugées « rétrogradées » en raison de conditions de pH défavorables. Ainsi, une correction de +30% est appliquée sur les sols dont le pH-KCl sera inférieur à 5 ou supérieur à 7. Les quantités disponibles sont calculées sur la base du P extrait par la méthode de Lakanen et Erviö, auxquelles on soustrait une « concentration pivot ». La différence exprime l'offre disponible du sol, qui peut donc être positive, négative ou nulle. Cette offre du sol est elle-même corrigée en fonction de la capacité des plantes à prélever facilement le P du sol (« Potentiel racinaire »), les coefficients variant de 0.5 (prairies fauchées intensives) à 1.2 pour maïs et pomme de terre. Finalement, le conseil de la dose à apporter se calcule comme la différence entre l'offre du sol ainsi calculée et l'exportation par la récolte. Il y a donc une assimilation directe du P extrait par la méthode de Lakanen et Erviö à du P prélevable par la plante.

Concernant le raisonnement de la fertilisation K, le diagnostic est basé sur la prise en compte de la valeur de K échangeable (méthode identique à celle utilisée pour le P, à savoir acétate d'ammonium, méthode Lakanen et Erviö 1971), compte tenu d'une valeur de CEC et d'une teneur en autres cations majeurs, tels que Ca et Mg. Pour les préconisations, le système est identique à celui décrit pour le P. Les coefficients multiplicatifs des besoins des plantes, liés à leurs « potentiels racinaires » évoluent de 0.3 pour les prairies fauchées intensives à 1.2 pour la pomme de terre.

3.3) Espagne

Contacts EJP : Benjamin Sanchez (National Institute for Agriculture and Food Research and Technology, INIA) sanchez.benjamin@inia.es

Autres contacts : Prof. Miguel Quemada (School of Agricultural Engineering- Technical University of Madrid) Miguel.quemada@upm.es

Guides de référence : Guia Practica de la fertilizacion racional de los cultivos en Espagna (2010) ; Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino ; Guide pratique de la fertilisation rationnelle des cultures en Espagne 2010. Chapitre d'ouvrage : Chapter 26, Fertilization with Phosphorus, Potassium and Other Nutrients, A. Delgado, M.Quemada, F. J. Villalobos, L. Mateos

A. Azote

La fertilisation N doit être calculée afin d'éviter un déficit (et une perte de rendement) ou un excès (coût accru, risque de pollution). Il est demandé aux agriculteurs de faire un bilan des entrées et des sorties d'N à l'échelle de la parcelle. Dans les entrées sont pris en compte l'N inorganique en début de culture déterminé par une analyse de sol, la minéralisation de l'humus, la contribution des apports de PRO, l'apport via l'irrigation, l'apport atmosphérique, les résidus de cultures, et dans les sorties, sont pris en compte l'exportation des cultures, le lessivage, la dénitrification, la volatilisation. Des références sont disponibles par culture sur les exportations de nutriments. Les postes relatifs aux pertes reposent sur des estimations : la lixiviation est considérée minimale si les bonnes pratiques agricoles sont respectées ; concernant les pertes gazeuses elles sont estimées à 10 kg N.ha⁻¹ d'après des valeurs moyennes. Dans le détail, la dénitrification est estimée dans les sols hydromorphes, acides et froids, à 20-30 kg N.ha⁻¹ et la volatilisation à 10 kgN.ha⁻¹.

B. Phosphore et potassium

La méthode de raisonnement de la fertilisation se base sur la mise en œuvre d'un diagnostic, suivi de recommandations. Pour le diagnostic, la texture du sol participe à la définition des 5 classes de fertilité, tandis que les recommandations se basent sur les quantités exportées. Les fiches du guide de référence sont présentées par culture, caractérisées par des niveaux d'exportations différents, mais il n'existe pas de notion d' « exigences » des cultures.

Pour déterminer les teneurs en P biodisponible des sols neutres et alcalins, c'est la méthode Olsen qui est utilisée. La méthode Bray I est utilisée dans les sols acides (dans la partie Ouest de la péninsule ibérique). A titre d'exemple, pour des sols argilo-limoneux-sableux, les classes de fertilité, au nombre de cinq, sont les suivantes (en mg P Olsen/kg) : très faible <6 ; faible 7-12 ; moyenne 13-18; forte 19-30 ; très forte >30. Ces données peuvent varier d'une région à l'autre.

Pour les recommandations de fertilisation, il est d'usage d'appliquer le principe de « Correction + maintenance », se traduisant selon la logique suivante :

- Teneur P ou K mesurées < Teneur critique \Rightarrow compenser les exportations + correction proportionnelle à l'écart entre les teneurs mesurées et critiques ;
- Teneur critique < Teneur P ou K mesurées < 2 X Teneur critique \Rightarrow compenser les exportations ;
- Teneur P ou K mesurées > 2 X Teneur critique \Rightarrow compenser moins que les exportations ou impasse.

Ce raisonnement se traduit par l'emploi de coefficients multiplicateurs selon la classe de fertilité à savoir : classe très faible : X 1,5 - classe faible : X 1,2 - classe forte à très forte : X 0.

Concernant le K, le raisonnement est le même que précédemment mais inclut également la compensation des pertes par lixiviation. La méthode d'extraction est celle à l'acétate d'ammonium. Les teneurs critiques sont d'autant plus élevées qu'il y a d'argile. Des calculs sont réalisables en fonction de la CEC des sols. A titre d'exemple, pour des sols argilo-limoneux-sableux, les cinq classes de fertilité sont les suivantes (en mg K/kg) : très faible <80 ; faible 80-160 ; moyenne 160-235; forte 235-390 ; très forte >390. Les coefficients multiplicatifs sont identiques à ceux du P (compris entre 0 et 1.5). Mais avec le K, la fertilisation est ajustée en fonction de la teneur en argile du sol : pour les sols argileux, un coefficient multiplicatif additionnel peut atteindre 5, alors qu'il n'est que de 1.1 pour les sols sableux. Les sols présentant un excès de K peuvent causer des problèmes de salinité et des carences en magnésium dues à l'antagonisme K/Mg.

Concrètement, il est recommandé de ne pas apporter plus de 100 kg de P_2O_5 .ha⁻¹ et de 275 kg de K_2O .ha⁻¹.

3.4) Irlande

Contacts EJP : David Wall (Teagasc) David.Wall@teagasc.ie

Autres contacts :

Guides de référence : Major & micro nutrient advice for productive agricultural crops- Teagasc, juin 2020 ; Teagasc, Johnstown Castle, Environment Research Centre, Wexford. ; Conseil sur les éléments nutritifs majeurs et mineurs pour une agriculture productive. Juin 2020

A. Azote

La stratégie de fertilisation N en Irlande se distingue en deux méthodes, une méthode pour les pâturages et une méthode pour les cultures de céréales, oléagineux et légumes. Dans les deux cas, le principe est de déterminer la dose d’N apportée par le sol et de compléter en engrais selon les besoins.

Pour les pâturages, l’agriculteur doit calculer l’N conseillé à l’échelle de chaque parcelle, selon le type de prairies et le chargement. Des tableaux de références permettent de trouver les doses d’N à apporter tout au long de la saison. L’agriculteur devra également faire un calcul de la dose d’N_{tot} apporté à l’échelle de l’exploitation, car cette dose ne doit pas dépasser les seuils fixés à la parcelle dans le cadre de la réglementation nitrates. Le cas échéant, les doses à l’échelle de chaque parcelle doivent être revues.

Pour les cultures céréalières, les oléagineux et les légumes, l’agriculteur doit déterminer l’indice de son sol. Cet indice permet de décrire l’état d’approvisionnement en N du sol et est déterminé selon l’historique de cultures, et du type de sol ; il n’y a à ce jour pas de mesure requise. Un fois l’indice de sol déterminé, l’agriculteur doit se référer aux tableaux de références qui pour chaque culture donnent la dose d’azote totale à appliquer. Cette dose peut être augmentée lorsqu’il est fait preuve d’un rendement plus élevé disponible. Les rendements supérieurs doivent être basés sur le meilleur rendement obtenu lors de l’une des trois récoltes précédentes.

B. Phosphore et potassium

Les démarches pour le raisonnement de la fertilisation P et K sont similaires. La méthode est inspirée de celle du Royaume-Uni (la référence DEFRA 2006 est souvent citée). Le diagnostic de fertilité PK se détermine par la même extraction chimique à l’acétate de sodium et à l’acide acétique (10%, à pH 4.8, méthode Morgan). Le résultat s’interprète en termes d’indice P ou K (« Soil Indice System »), avec 4 classes de fertilité croissante. La classe-cible est la classe 3.

Le calcul des quantités P et K préconisées se fonde sur les exportations des cultures. Il existe des tableaux-types en fonction des rendements et des cultures. Ces tableaux renseignent aussi sur la fumure de redressement concernée pour les niveaux de fertilité 1 et 2. Les conseils préconisés (pour P) se réfèrent au programme d’action national relatifs à la Directive Nitrates (EU Nitrates Directive - National Action Programme regulations, statutory instrument 605 of 2017 – the European Communities Regulations 2017 (Good Agricultural Practice for Protection of Waters)). Les quantités supplémentaires apportées sont de +10 kg de P pour la classe 2, et de +10 kg de P supplémentaires pour la classe 1, pour les céréales à paille et le colza. Pour la betterave, l’incrément de fertilisation entre les indices 3 et 2 puis 2 et 1 est de 15 kg de P (pour chaque changement de classe), de 25 pour la pomme de terre. Dans le cas du maïs, il est de +10 et de +20 pour le passage de l’indice 3 à 2 et 2 à 1, respectivement.

Concernant le K, la fumure complémentaire incrémentée entre les classes 3 et 2, puis 2 et 1 est de + 15 kg de K pour les céréales à paille et le colza. L'incrément est de +25kg K pour le maïs, +60 pour la betterave, et de +80 kg K pour la pomme de terre.

Ces différences de quantités apportées à chaque franchissement d'indice P ou K témoignent d'une forme de sensibilité ou d' « exigence » des cultures différente vis à vis du P et du K. Cette typologie des exigences est confirmée par le fait que pour les cultures de betterave et de pommes de terre et de maïs, une fertilisation est préconisée pour les sols atteignant la classe 4 de fertilité. Par exemple, pour le maïs, un apport de 20 kg de P et de 120 kg de K est préconisé même pour les sols de la classe 4.

3.5) Italie

Contacts EJP : Alessandra Trincherà (Council for Agricultural Research and Economics, CREA)
alessandra.trincherà@crea.gov.it

Autres contacts : Luca Bechini (Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali, Università degli Studi di Milano) luca.bechini@unimi.it

Guides de référence :

- Linee guida nazionali di produzione integrata 2020, 72p. 2019
- Les lignes directrices nationales pour la production intégrée en 2020, 2019
- Fertilizzazione bilanciata e avvicendamento. Produzioni agricole integrate. Generalità. Linee guida per la concimazione. Regione Lombardia
- Fertilisation et rotation équilibrées. Production agricole intégrée. Généralité. Directives de fertilisation. Région Lombardie

a. Azote

La fertilisation azotée italienne est basée sur une méthode de bilan des entrées et des sorties sur la parcelle. L'utilisation de dose standard est également permise, ces doses sont calculées au niveau national et sont adaptées par régions.

Le bilan est basé sur un objectif de rendement et le besoin unitaire des cultures. Les paramètres pris en compte sont, pour les entrées d'N: les disponibilités des réserves du sol, estimées par analyse de sol, la minéralisation de l'humus, l'apport d'N des résidus de culture, les apports des fertilisations des années précédentes (apport des anciens PRO et les contributions naturelles (e.g. dépôts atmosphérique); pour les pertes d'N, une perte totale est estimée (lixiviation, volatilisation, ruissellement, immobilisations). La lixiviation peut être estimée par deux méthodes, la première calcule un pourcentage d'N lixivié selon les précipitations dans la période du 1er octobre au 31 janvier ; la deuxième méthode propose des facteurs de corrections selon le type de sol et le drainage.

Ce bilan doit être refait tous les ans.

L'apport d'N doit être fait en priorité par des engrais organiques, et les engrais chimiques sont utilisés pour compenser un déficit ou une indisponibilité des amendements et engrais organiques. Dans tous les cas les apports d'N doivent être fractionnés et ne pas dépasser 100KgN/ha, cette contrainte ne s'applique pas aux matières fertilisantes à libération lente, tels que les engrais organiques qui indiquent un taux d'humus et une teneur en carbone humique et fulvique d'au moins 35% et 2,5%.

b. Phosphore et potassium

Une méthode nationale fournit des données générales, auxquelles se substituent des données régionales lorsque celles-ci sont disponibles.

Le raisonnement de la fertilisation PK se base classiquement sur une analyse de terre, comparée à un seuil de « suffisance ». La dose préconisée inclut explicitement l'écart entre la valeur de P et K biodisponible mesurée et leur valeur-seuil respective. La dose à apporter est la somme des besoins de la culture, des pertes au champ (lixiviation du K, immobilisation du P par le Ca, du K par les argiles) et du déficit de stock en P ou K biodisponible (en ppm traduits en kg.ha⁻¹ grâce à la masse du sol). Il y a donc utilisation directe de la valeur de l'élément biodisponible pour établir le diagnostic et la recommandation.

Cas spécifique du P - La méthode d'extraction est choisie en fonction du taux de calcaire actif (Bray & Kurtz pour les sols acides, Olsen dans le cas des sols neutres et alcalins). Le seuil dépend de la classe

d'exigence (3 classes principales), de la texture et du taux de calcaire. Pour pallier l'immobilisation de l'engrais apporté, des valeurs de CAU (efficacité de l'engrais) sont proposées en fonction du pH et du taux de calcaire actif ; Ces valeurs varient de 0.5 à 0.8. A noter l'interdiction d'apporter plus de 200 kg P2O5 ha⁻¹ an⁻¹.

Cas spécifique du K - Le seuil de suffisance en K peut être obtenu par une fonction de la CEC ou de la texture, selon les régions. La méthode de détermination du K échangeable est plurielle : cela peut être de l'extraction Mehlich III, de l'acétate d'ammonium à pH 7 ou du BaCl₂ -Triethanolamine tamponnée à pH 8.2 (EJP). Les pertes en K sont fonction de la teneur en argile. Il existe en outre un « facteur d'immobilisation » (G) qui tient compte de la quantité de potassium rendue indisponible par des processus chimiques et physiques lors d'une fertilisation : $G = 1 + (0,018 \times \text{argile} [\%])$. Dans le cas du K, il n'y a pas de classes d'exigences des cultures.

3.6) Luxembourg

Contacts EJP : Pas de contact

Autres contacts : Simone Marx, ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement rural du Grand-Duché du Luxembourg

Guides de référence : Recueil de législation /Journal officiel du Grand-Duché du Luxembourg 2000 et 2014

A. Azote

La fertilisation azotée au Luxembourg se raisonne selon la méthode allemande « Düngeverordnung », soit avec le calcul d'une dose maximum d'application qui varie selon le rendement estimé et le coefficient d'efficacité des engrais organiques, fixé dans la zone vulnérable.

Un tableau de référence national pour les besoins en N par unité de rendement est disponible. Les doses d'azote apportées sont aussi définies selon l'azote accumulé dans la culture à la récolte et l'azote exporté.

L'azote apporté par les engrais minéraux a une efficacité considérée de 100% ; pour les PRO cela va dépendre du type de fumier, du type de culture et de la période d'application. L'application de N organique est plafonnée à 170 KgN.ha⁻¹.

B. Phosphore et potassium

Concernant le P, la stratégie consiste à appliquer des doses en fonction de la classe de fertilité du sol (1 analyse de sol/5 ans/parcelle) et du rendement estimé. L'objectif est d'avoir des conditions de rendement optimales sans excès de P disponible dans les sols. Ainsi il y a une application d'engrais P pour un rendement de référence pour chaque groupe de cultures arables et sur les prairies permanentes.

Il y a une méthode unique d'analyse des sols qui permet de déterminer l'état de fertilité des sols. Cet état de fertilité est partagé en 5 classes et adapté à 4 types de sols (fonction de la texture et du pourcentage de cailloux).

Les extractants utilisés sont un mélange de CAL (Ca Lactate (0.05mol/l), Ca Acetate (0.05mol/l) et d'acide acétique (0.3mol/l) à pH 4.1. La procédure d'extraction suit un ratio de 1 : 20 (m : V), 5 g, 100ml, pour une durée de 1h30min. la référence citée pour cette méthode est empruntée à la méthode allemande « A 6.2.1.1 VDLUFA ».

Les classes de fertilité et dose d'apport sont les suivantes : A- Pauvre (+60 kg P₂O₅), B- Sous optimum (+30Kg P₂O₅), C- optimum, D- Riche, E-très riche p=0

La recommandation de fertilisation en P dépend donc du P-exporté par la culture selon le rendement qui est dans un second temps corrigé par la classe de fertilité P.

3.7) Pays-Bas

Contacts EJP : Wieke Vervuurt wieke.vervuurt@wur.nl (échecs de contact)

Autres contacts : Arjan Reijneveld (laboratoire Eurofins, Fertilization Recommendation Committee) arjanreijneveld@eurofins.com - Oene Oenema (Wageningen) oene.oenema@wur.nl

Guides de référence : <https://www.handboekbodemenbemesting.nl/>

For arable farming & vegetables available at: <https://www.handboekbodemenbemesting.nl/>

For grassland & fodder crops available at: <https://edepot.wur.nl/413891>

Fertilization restrictions for nitrogen are available at:

<https://www.rvo.nl/sites/default/files/2020/02/Tabel-2-Stikstof-landbouwgrond-2019-2021.pdf>

Fertilization restrictions for phosphate are available at: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/agrarisch-ondernemen/mest/gebruiken-en-uitrijden/hoeveel-fosfaat-landbouwgrond>

A. Azote

Le calcul de la dose d'N à apporter à la culture est calculé selon le rendement optimum de chaque culture et de l'N minéral déjà présent dans les sols. Ainsi les agriculteurs calculent la dose nécessaire au rendement optimum de la culture à laquelle est retranché l'N minéral du sol.

Des tables de références pour l'N optimum par culture sont disponibles.

Le fractionnement de la dose d'N est obligatoire ; des tables de référence de fractionnement de la dose en fonction des cultures sont disponibles. Dans la pratique, des analyses de sol ou des analyses des feuilles sont effectuées au cours de la saison afin d'ajuster au mieux la dose d'azote.

L'efficacité des engrais minéraux n'est pas prise en compte dans le calcul de la dose à apporter, cependant un pourcentage d'azote efficace est considéré pour les engrais organiques. Ainsi la quantité d'azote minérale apportée va dépendre du PRO apporté.

B. Phosphore et potassium

L'estimation de la biodisponibilité du P est désormais (depuis 2006) mesurée par 2 indicateurs, P-CaCl₂ et P-AL, rappelant les facteurs d'« intensité » et de « capacité », respectivement. Pour le K, l'extraction se réalise par une extraction acide (HCl 0.1M et acide oxalique 0.4 M).

Les teneurs en P ou K biodisponibles ne sont pas traduites en classes de fertilité, mais directement utilisées pour des calculs de doses. Les calculs de doses sont donc fonction d'un continuum de valeurs de P (CaCl₂ + P-AL) et K(HCl).

Pour P et K : La fertilisation est raisonnée selon deux critères, le sol et la culture ; la dose appliquée correspond au maximum des deux doses calculées.

- La recommandation axée sur le sol vise à maintenir le statut P ou K du sol. Cette recommandation concerne l'entretien à long terme de la fertilité des sols, et fixe le cadre réglementaire.

- La recommandation axée sur la culture vise à assurer le rendement économiquement optimal avec une fertilisation P ou K. C'est une recommandation à l'échelle annuelle. Il existe 5 classes de culture pour le P et le K. Ces classes d'exigences sont fondées sur une combinaison des critères densité de système racinaire croisée avec la durée de présence au champ de la culture. C'est ce qui explique par exemple que les céréales à paille, bénéficiant d'un enracinement dense et restant en place près de 9 mois, soient considérées comme non exigeantes. Pour P, il existe des références spécifiques selon que la fertilisation soit localisée ou en plein.

A l'avenir, l'utilisation d'une mesure de biodisponibilité (extraction pour P et K à CaCl_2 0.01M) couplée à une estimation par spectroscopie proche-infrarouge (P-total, CEC, K-CEC) devrait permettre d'accélérer et d'affiner les recommandations.

A noter, à l'échelle du pays, l'obligation d'un bilan P inférieur ou égal à 0. La traduction à l'échelle d'une exploitation agricole, voire parcellaire, n'a pas été précisée.

3.8) Royaume Uni

Contacts EJP : Suzanne Higgins (Agri-Food and Biosciences Institute, AFBI) Higgins@afbini.gov.uk

Autres contacts :

Guides de référence :

- Nutrient Management Guide (RB209), 8 edition, June 2010 52p : www.tsoshop.co.uk
- Guide des engrais (RB209), 8^{ème} édition, Juin 2010

A. Azote

L'objectif principal du calcul de la fertilisation N au Royaume-Uni est d'atteindre un rendement économique optimal. Il y a ainsi une prise en compte du coût des engrais et de la notion de rentabilité économique. De plus, le calcul de la fertilisation a aussi pour but d'avoir le minimum d'impact sur l'environnement.

L'agriculteur doit définir l'approvisionnement du sol en azote (*SNS : Soil Nitrogen Supply*), ce qui comprend trois types de stocks d'N : minéral du sol, minéralisable du sol et déjà présent dans la culture. D'autres sources d'N sont également prises en compte dans le calcul de la fertilisation: IN atmosphérique (fixation symbiotique et azote déposé par les précipitations ou directement de l'atmosphère), l'N des PRO, le lessivage, la volatilisation, la dénitrification, les exigences particulières en matière de qualité des cultures, les résidus de culture.

Sept indices de SNS ont été établis à l'échelle nationale, et l'agriculteur, en fonction des caractéristiques de sa parcelle et de son rendement, doit se référer à la quantité d'azote indiquée par l'indice.

De plus, il existe un coefficient que l'on pourrait assimiler au CAU, qui concerne les engrais minéraux et qui dépend des types de sol.

B. Phosphore et potassium

Les diagnostics sont basés sur des méthodes d'extractions (P-Olsen, K-NO₃NH₄). Les valeurs de fertilité définies par les extractions se répartissent en 9 classes. Les cultures légumières se distinguent de toutes les autres par des seuils de fertilité plus élevés. De manière générale, les sols ayant atteint la classe de fertilité souhaitable (level 2) doivent recevoir l'équivalent des exportations des cultures à venir. Il n'y a pas d'autres facteurs de correction. Pour les sols dont les niveaux de fertilité s'éloignent de la classe-cible (level 0, level 1), des corrections forfaitaires annuelles sont proposées (de 30 à 100 kg de P₂O₅ ou K₂O par ha et par an), en fonction de la vitesse à laquelle on souhaite combler d'écart (de 5 à 15 ans). Pour P comme pour K, certaines situations pédologiques (calcaire actif, texture, respectivement) rendent inatteignable le seuil de teneur critique du « Level 2 ». Dans ces situations, le seuil du « level 1 » sera ciblé, mais sans changer pour autant les doses préconisées (exportations). Il est bien précisé que les compensations des exportations ne sont pas forcément suffisantes pour maintenir les niveaux des sols aux valeurs seuils. On pallie l'écart éventuel en recommandant des analyses tous les 5 ans.

Cas spécifiques :

- En cas de non-travail du sol, remplacer le prélèvement 0-15 par un prélèvement 0-23 cm.
- Diagnostics : les teneurs sont exprimées en mg de POlsen ou K par litre de sol
- Pour P, la Pomme de terre est reconnue donner de meilleurs rendements avec des doses supérieures à celles calculées en théorie

3.9) Suisse

Contacts EJP : juliane Hirte (Agroscope) juliane.hirte@agroscope.admin.ch

Autres contacts :

Guides de référence : PRIF 2017, Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse. Sinaj & Richner : <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/themes/environnement-ressources/sol-eaux-elements-nutritifs/projekte-zur-verbesserung-der-naehrstoffeffizienz/grud.html>

A. Azote

Le raisonnement de la fertilisation azotée suisse a pour but de rester dans un cycle des éléments nutritif le plus fermé possible.

Trois méthodes sont potentiellement utilisées en Suisse pour calculer la dose d'azote à apporter :

- la méthode de la norme corrigée
- la méthode du N_{min}
- La méthode du bilan prévisionnelle du COMIFER

(1) La méthode du bilan est aujourd'hui utilisée seulement sur les betteraves sucrières.

(2) La méthode principalement utilisée est la méthode de la norme corrigée. Cette méthode a pour principe de calculer une dose de référence par culture, corrigée selon l'objectif de rendement, auquel est appliquée une correction selon certaines conditions pédoclimatiques et culturales.

Les facteurs de corrections sont :

- l'effet du type de précédent cultural et sa date d'enfouissement sur la minéralisation des résidus de culture
- le potentiel de minéralisation de la MO
- la proportion (calculée) du N contenue dans les engrais organiques disponibles de l'année suivant celle de l'apport (arrière effet)
- l'estimation de l'effet des pluies sur les pertes de N
- les effets positif (simulés) de sarclages répétés sur la minéralisation de la matière organique
- les effets des conditions printanières sur la minéralisation de la Matière Organique

Les normes et les facteurs de corrections sont tous détaillés dans des tableaux, disponibles en annexe de ce rapport.

(3) La méthode du N_{min} (« minéral ») est basé sur un N de référence (N minéral du sol) auquel est retranché le N minéral disponible à la parcelle. Le N_{min} est une valeur mesurée à la parcelle, et prend en compte les éléments pédoclimatiques et culturaux mentionnés dans la méthode de la norme corrigée.

B. Phosphore et potassium

Tous les principes sont communs à P et K, y compris la méthode d'extraction, l'influence de la teneur en argile et en humus (quand celle-ci est supérieure à 10%) sur les valeurs-seuils et les facteurs de corrections. La méthode d'extraction commune est celle dite de l'« eau saturée en CO_2 » (Dirks et Scheffer 1930), mais la méthode officielle est désormais l'extraction à l'acétate d'ammonium et EDTA (AAE). Concernant le P uniquement, cette dernière méthode n'est pas recommandée pour les sols

carbonatés. Une méthode d'extraction à l'eau existe, mais il n'existe pas de références sur grandes cultures.

Le calcul de la fertilisation P et K se base sur le principe du remplacement des éléments nutritifs prélevés par les cultures dans des sols normalement pourvus en ces éléments. L'adaptation de la fertilisation à la teneur en éléments nutritifs du sol se fait d'après des facteurs de correction compris entre 0 et 1.5.

La notion d'exigence de culture est présente ; 3 coefficients multiplicatifs de la dose de fertilisant calculée (0.8 - 1 - 1.2) traduisent des exigences faibles, normales et fortes.

Pas de normes environnementales.

Sur K, max de 300 kg K_2O /ha afin d'éviter les carences induites en Mg.

4) Synthèse

4.1) Raisonnement de la fertilisation N

4.1.1. Diagnostics et préconisation basés sur l'objectif de rendement de la culture

Dans cette étude, nous avons regardé dans un premier temps quels étaient les postes pris en compte dans les calculs de fertilisation dans les pays européens étudiés. Tous les pays européens prennent comme base de réflexion l'objectif de rendement des cultures dans le calcul de la fertilisation azotée. À la suite de cela nous observons de grandes disparités dans la prise en compte de facteurs pouvant influencer sur la dose d'azote.

Le tableau n°1 ci-dessous présente les postes qui sont pris en compte pour le calcul de la dose d'azote à apporter pour chacun des pays étudiés. On peut en outre constater que la méthode du bilan utilisée en France est une des méthodes prenant en compte le plus de postes, et que les pays qui se rapprochent le plus de la méthode française sont l'Espagne, l'Italie et la Suisse.

Pour finir, certains postes sont très spécifiques à certains pays, comme le prix des engrais (RU) et l'effet du sarclage répété sur la minéralisation (CH).

	Suisse	Belgique	Allemagne	Italie	Espagne	Roy-Uni	Pays Bas	Luxembourg	France
Objectif de rendement	Culture paille Colza								
N min									
Minéralisation MO									
Effet Précédent (Résidus de culture)									
Arrière effet des PRO									
Lixiviation									
Volatilisation									
Effet sarclage répété sur la minéralisation									
Effets conditions printemps sur miné.									
Prix des engrais									

	Pris en compte dans le calcul
	Prise en compte pour certaines cultures
	Non pris en compte

Tableau 1 : Postes pris en compte dans le calcul de la dose N à apporter par pays

4.1.2. A l'échelle de l'agriculteur, des méthodes différentes de calcul de la dose

Bilan des entrées et des sorties à l'échelle de la parcelle	Dose de référence selon la culture corrigé selon +/- facteurs	Dose « Plafonnée »
Italie Espagne	Suisse Allemagne Royaume Uni	Belgique Luxembourg

Tableau 2: type de méthode de calcul de la fertilisation azotée

Au vu du tableau n°1, les pays européens prennent en compte des postes similaires dans le calcul de la fertilisation azotée, avec plus ou moins de postes pris en compte.

Cependant à l'échelle de l'agriculteur, le calcul de la dose d'azote à apporter peut-être très différent. Nous avons réparti les méthodes selon trois catégories :

- Bilan des entrées et des sorties à l'échelle de la parcelle : dans les pays renseignés dans cette catégorie, les agriculteurs effectuent un bilan similaire à celui pratiqué en France.
- Dose de référence selon la culture corrigée selon différents facteurs : Dans cette catégorie sont présents les pays dans lesquels les agriculteurs doivent se référer à une dose d'azote. Cette dose de référence est établie différemment selon les pays. Dans un second temps, l'agriculteur peut moduler cette dose de référence selon d'autres critères.
- Dose « plafonnée » : Dans cette catégorie, l'agriculteur doit se référer à une dose de référence qu'il ne peut pas dépasser.

On constate donc qu'une majorité des pays étudiés proposent des doses de référence par type de culture aux agriculteurs et non un calcul précis à l'échelle de la parcelle et pour la durée de la culture.

4.1.3. Deux types d'exigence : exigence de moyens et exigence de résultats

Exigence de moyens	Exigences de Résultats
Italie, Espagne, Suisse, Luxembourg, Royaume Uni	Belgique : Reliquat N post-récolte Allemagne : Bilan des pertes de N à l'échelle de l'EA

Tableau 3 : Type d'exigence concernant la réglementation nitrate

Au niveau réglementaire, deux types d'exigences sont possibles pour la mise en œuvre d'une fertilisation raisonnée. On classe ces exigences en deux catégories, une exigence de moyens et une exigence de résultats.

Les exigences de moyen sont des exigences concernant les pratiques de fertilisation des agriculteurs. On retrouve dans ces exigences les obligations suivantes par exemple :

- Une obligation de calcul
- Des doses plafond à ne pas dépasser, sur l'azote total, sur l'azote organique et / ou sur l'azote minéral
- Des obligations de fractionnement de la dose
- Des périodes d'interdiction d'épandage

Concernant des exigences de résultats, seul deux pays y ont recours, le Belgique et l'Allemagne.

En Belgique, les agriculteurs doivent faire une analyse de sol après la récolte, une analyse qui permet de déterminer l'azote potentiellement lessivable « APL ». Les reliquats d'azote sont mesurés sur un horizon 0-90 cm et sont comparés à des reliquats mesurés dans un réseau de référence. Si le contrôle montre que l'exploitation à des résultats non conforme, l'exploitant devra s'inscrire à un programme d'observation suite auquel les résultats sur l'exploitation devront s'améliorer. Si les résultats n'évoluent pas, des amendes sont prévues.

En Allemagne, les agriculteurs doivent à la fin de chaque année faire le bilan des apports et des exportations d'azote à l'échelle de l'exploitation. Ce bilan permet de comptabiliser les pertes d'azote à l'échelle de l'exploitation agricole, ces pertes de doivent pas dépasser 170 Kg N.ha⁻¹ sous peine de fortes amendes.

4.1.4. Synthèse sur les spécificités repérées dans les méthodes nationales

Au cours de nos recherches sur les méthodes de raisonnement de la fertilisation azotée dans ces pays européens, nous avons identifié des spécificités nationales intéressantes :

- Italie : Utilisation en priorité de l'azote organique ; fractionnement obligatoire ;
- Espagne : Utilisation d'urée plafonné à 25% de l'apport de N total ;
- Royaume-Uni : Prix de l'engrais pris en compte dans le calcul des doses ;
- Suisse : recommandations de fractionnement par culture et par stade (max d'apport autorisé) ;
- Luxembourg : Coefficient de disponibilités des engrais organiques, qui permet de moduler la dose de référence
- Allemagne : L'agriculteur fait un calcul *a priori* de la dose à apporter par culture et effectue un bilan, *a posteriori*, des flux d'azote à l'échelle de l'EA pour estimer les pertes d'azote. Le bilan doit être inférieur à 170 kg N / ha
- Belgique : Exigence de résultats par un reliquat azoté après la récolte

4.2. Raisonnement de la fertilisation P K

4.2.1. Diagnostics basés sur le principe (unique) d'extractions chimiques (multiples)

Sans exception, toutes les méthodes sont basées sur le principe d'un diagnostic chimique établi grâce à une extraction chimique ménagée. La nature des extractions change d'un pays à l'autre. Pour le phosphore, les mécanismes mettent en œuvre de l'échange anionique, de la dissolution acide ou de la complexation des phosphates par des cations (tableau 4).

Pour le potassium ; la majorité des extractions met en œuvre de l'échange de cations (ammonium, calcium, tableau 5). Dans des cas plus rares, les extractions semblent aussi s'attaquer au K fixé (extractions acides, triethanolamine). Dans environ 50% des cas, la méthode d'extraction du P est identique à celle du K.

Les résultats des analyses définissent ou bien des classes de fertilité (3 à 5 en général), avec une classe médiane qualifiée de « normale », « suffisante », « cible », etc. ..., ou bien déterminent une quantité de P ou de K biodisponibles qui sera directement comparée à des besoins des plantes (Belgique Wallone, Italie) au sein d'un bilan qui assimile donc la forme extraite par un produit chimique à celle qui sera exactement prélevée par la plante pendant la durée de sa croissance.

Pays	Méthode	Extractants chimiques	Mécanisme
Royaume-Uni	Olsen	Bicarbonate de sodium, pH 8.5	Complexation par cations
France			
Italie			
Espagne (sols pH ≥7)			
Belgique (Wal)	NH ₄ Ac EDTA	Acétate d'ammonium + Acide acétique + EDTA, pH 4.65	Echange anionique, Dissolution acide
Suisse			
Espagne (sols pH < 7), Italie	Bray et Kurtz	Fluorure d'ammonium fluoride + acide chlorydrique	Complexation par cations, dissolution
Allemagne	CAL	Acetate de Ca+ Lactate de Ca + Acide Acétique, pH 4.1	Echange anionique, Dissolution acide
Belgique (Fl)	AL	Lactate d'ammonium + Acide acétique, pH 3.75	Echange anionique, Dissolution acide
Irlande	Morgan	0.7 M NaC ₂ H ₃ O ₂ + 0.54 M CH ₃ COOH – pH 4.8.	cations, dissolution
Pays-Bas	Ca-Cl ₂ et AL	CaCl ₂ d'une part, Lactate d'ammonium + Acide acétique, pH 3.75 d'autre part	Echange anionique, Dissolution acide
Suisse	H ₂ O CO ₂ sat	H ₂ O + CO ₂ , pH acide	Désorption

Tableau 4 : Méthodes d'extraction du P selon les pays

Pays	Méthode	Conditions chimiques	Semblable à P ?
Belgique (Wal)	Acétate Ammonium	pH 7	Oui
Espagne			Non
France			Non
Italie			Non
Suisse			Oui
Allemagne	CAL	Acetate de Ca+ Lactate de Ca + Acide Acétique, pH 4.1	Oui
Italie	Mehlich III BaCl ₂	0.015 M amm. fluoride + amm. nitrate + nitric acid, pH 2.5 et Triethanolamine, pH 8.2	Oui
Irlande	Morgan	pH 4.8	Oui
Pays-Bas	HCl + A Oxal	0.1 M	Non
Royaume Uni	NO ₃ NH ₄	pH 7	Non

Tableau 5 : Méthodes d'extraction du K selon les pays et comparaison avec celles utilisées pour le P

4.2.2. Notions d'exigences des cultures

Pour un type de sol donné, une même teneur en P ou en K biodisponible peut s'avérer non limitante pour la croissance d'une culture, et limitante pour une autre. Sans rentrer dans les détails, ces spécificités tiennent à des caractéristiques morphologiques des plantes, à leur fonctionnement physiologique, leurs potentiels de croissance, etc. ... La prise en compte de ces spécificités peut amener certains pays à créer des « groupes » distincts de cultures, agrégés par classes de « sensibilité » ou d'« exigences ». Des « corrections » peuvent ainsi être introduites sur la définition des valeurs-seuils, et plus globalement des classes de fertilité, ainsi que sur les quantités préconisées, pour tenir compte d'éventuelles différences d'exigences.

Les pays faisant explicitement état de classes de cultures vis à vis de leurs besoins de disponibilité dans le sol sont la Belgique (Wallonie), l'Irlande, l'Italie (uniquement pour le P), les Pays-Bas et la Suisse. L'Allemagne ne fait une exception que pour la betterave, et le Royaume-Uni pour la pomme de terre. Sur le plan des mécanismes sous-jacents, seuls les Pays-Bas et la Belgique (Wallonie) avancent la « densité racinaire » et le « potentiel racinaire », respectivement, pour expliquer ces classes. Les Pays-Bas croisent les aspects racinaires avec ceux de durée de présence en terre de la culture.

Si la pomme de terre et la betterave sont assez unanimement reconnues pour faire partie de la catégorie des plantes les plus « exigeantes », le classement par pays est plus contrasté pour les autres plantes (figure 1).

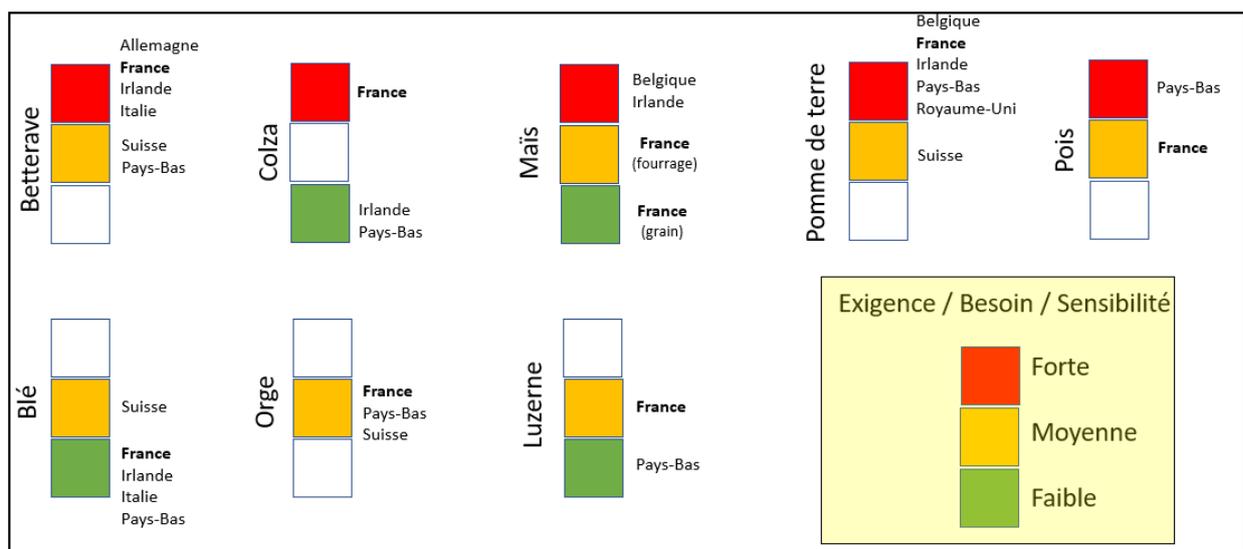


Figure 1 : Répartition en 3 classes d'exigences de différentes plantes vis à vis du phosphore, selon les pays enquêtés

La plupart des pays ayant défini des classes d'exigences pour le P l'ont également fait pour le K, à l'exception de l'Italie qui n'admet pas de classement d'exigence pour le K. La classification des cultures est généralement la même, bien que des différences puissent exister, comme en France où l'orge et le colza sont des cultures réputées plus exigeantes pour le P que pour le K.

4.2.3. Raisonnements sur les quantités préconisées

L'objectif de la fertilisation PK est de faire converger la teneur en la forme biodisponible du sol vers une teneur-objectif ou cible (figure X, illustrée pour le P, VDLUFA). A cette teneur-objectif, la fertilisation P et K est égale aux quantités exportées dans les récoltes, de manière à maintenir les teneurs en P et K biodisponibles du sol dans un état d'équilibre. Pour certains pays, les pertes environnementales ainsi que les « rétrogradations chimiques » (e.g. lixiviation du K, insolubilisation du P par le Ca ou les hydroxydes de Fe et d'Al), s'ajoutent aux exportations.

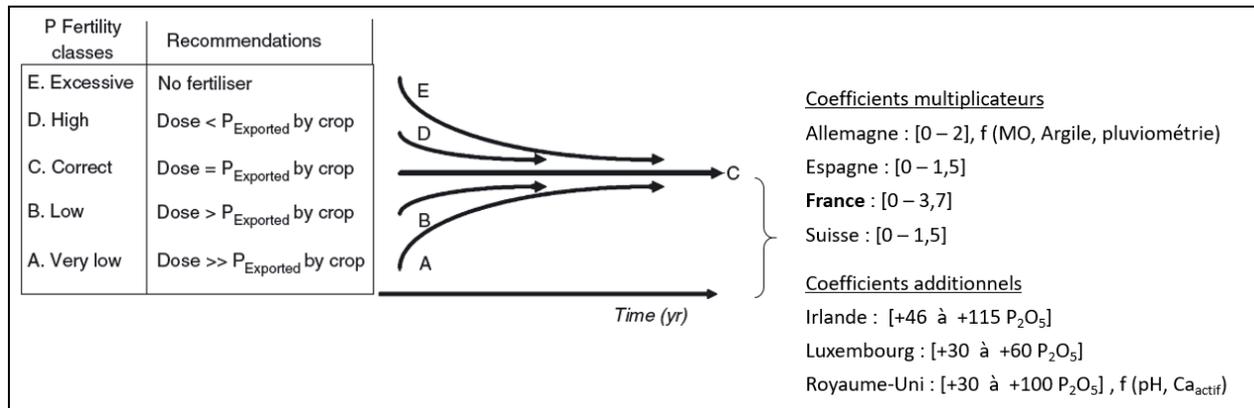


Figure 2 : Trajectoires des teneurs en P biodisponible du sol en fonction des teneurs initiales visées par les stratégies de fertilisation (d'après le document allemand VDLUFA). Celles-ci s'appuient sur des coefficients multiplicateurs ou additifs des quantités exportées et perdues à l'échelle parcellaire

Pour l'ensemble des pays enquêtés, les quantités exportées (aux pertes-près) sont systématiquement utilisées dans le calcul des quantités de fertilisants. Lorsque la fertilité du sol se situe dans la classe-cible, la fertilisation est égale aux exportations estimées. Lorsque les sols présentent des disponibilités en P inférieures au niveau souhaitable, les quantités exportées sont multipliées par un coefficient corrélé à l'écart (Allemagne, Espagne, France, Suisse), ou additionnées de valeurs croissant avec l'écart à la norme (Irlande, Luxembourg, Royaume Uni, figure 2). En deçà du seuil, les coefficients multiplicateurs sont inférieurs à 1, voire nuls. Cela dépend entre autres des types de sol et de l'exigence des cultures.

Dans de plus rares cas (Italie, Belgique), les quantités préconisées sont directement calculées à partir d'un bilan entre les exportations et le stock de P ou de K extractible, et définies comme la différence entre une quantité « objectif » et une quantité « extractible », en ayant donc recours à la masse de terre. Dans ces deux cas, les quantités de P ou K mises en solution par les extractants sont directement estimées être du P ou du K biodisponible, sans transformation mathématique préalable. Les extractions assimilables à un bilan biogéochimique sont le P Olsen (Italie) et le P extrait à l'acétate d'Ammonium à pH acide (Lakanen et Erviö, 1971). L'extraction utilisée est celle à l'acétate d'ammonium à pH 7.

4.2.4. Synthèse sur les innovations repérées dans les méthodes nationales

Toutes les méthodes de raisonnement sont globalement identiques (mises en œuvre successives d'une extraction chimique ménagée, d'un diagnostic par rapport à des valeurs seuils, d'une préconisation visant à amener le sol à une teneur critique et à s'y maintenir par des restitutions équivalentes aux exportations). Néanmoins, certaines méthodes proposent quelques originalités, classées par ordre d'intérêt décroissant sur la figure 3. La démarche qui nous a semblé la plus originale est proposée par les Pays-Bas, bien qu'encore en phase de développement. La méthode consiste à assortir le diagnostic d'extraction chimique du P et du K biodisponibles (jugée représenter une biodisponibilité à court terme) par une méthode rapide et non destructive (spectroscopie proche Infra-rouge) d'estimation du pouvoir tampon vis-à-vis de ces nutriments (P_{total} et CEC pour le P et le K, respectivement). Avec une fonction de pédo-transfert, ces mesures peuvent être converties en réserve de nutriments et être utilisées non seulement pour affiner le seuil d'impasse, mais aussi pour permettre un calcul plus rationnel de la dose à apporter. En France, cette méthode rappelle celle qui allie la mesure du P en solution et du phosphore diffusible (C_p et P_r, Messiga *et al.* 2015¹).

D'autres travaux prometteurs concernent des cas de non-travail du sol : les Pays-Bas ont fourni des recommandations adaptées au « Strip Till », technique consistant à ne travailler et ne fertiliser que la bande de semis. Le R.U. a, quant à lui, travaillé sur l'impact du non-labour sur la profondeur de prélèvement qui reste compatible avec les références des systèmes labourés.

D'autres innovations, enfin, touchent à la prise en compte du coût des engrais dans les recommandations de fertilisation (R.U.) ou à des définitions de doses-planchers pour le P (raisons environnementales) ou le K (risques de carences induites en Mg).

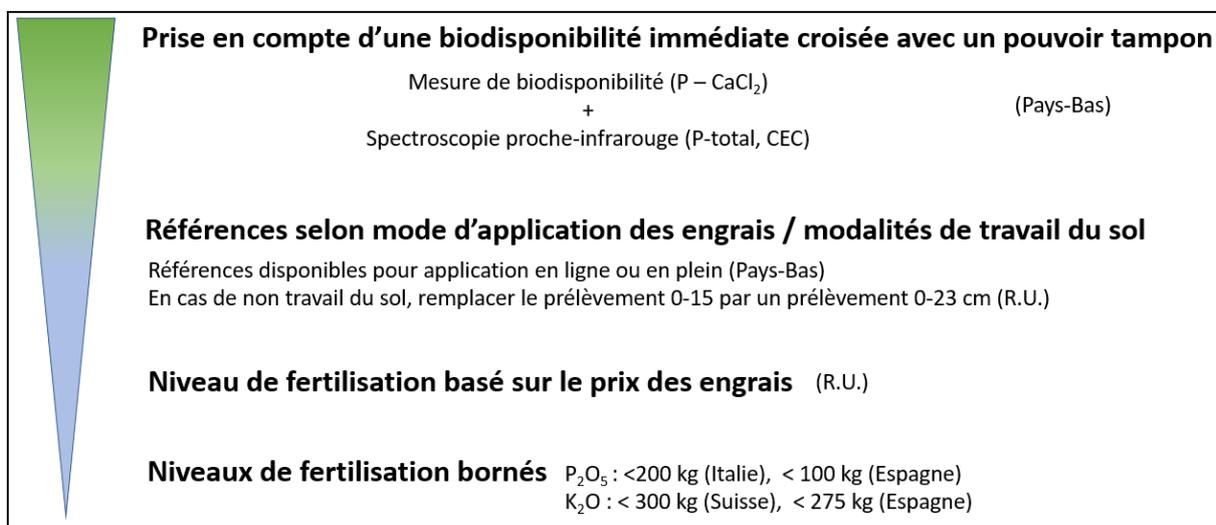


Figure 3 : Innovations repérées dans les méthodes européennes au niveau de la fertilisation P et K

¹ Process-based mass-balance modeling of soil phosphorus availability: Testing different scenarios in a long-term maize monoculture. *Geoderma*, 243, 41-49, doi: 10.1016/j.geoderma.2014.12.009

5. Suites à donner à ce travail

5.1) Comparaison chiffrée des résultats des méthodes

Nous avons ici présenté les grands principes de raisonnement des fertilisations N-P-K dans plusieurs pays frontaliers de la France, ou proches. Cette étape d'inventaire peut nous permettre des comparaisons dans les choix de schémas de raisonnement faits suivant les pays. Mais on en reste à une approche assez qualitative.

Pour comparer vraiment les systèmes de raisonnement, il faut aborder les valeurs des seuils (ou plafonds, etc...) de référence, et les méthodes de leur établissement. De même pour les paramètres utilisés dans le calcul des doses, dont les estimations (quantification) de termes de flux ou de bilans. Ceci peut signifier un énorme travail de comparaison des sources et des méthodes, difficile à faire sinon par (ou en collaboration avec) les personnes qui ont établi ces références. Car chaque étape du raisonnement, chaque paramètre mis en œuvre peut cacher une spécificité nationale, par exemple au niveau des méthodes de définition des paramètres de caractérisation des sols : méthode d'analyse granulométrique, définition des classes de texture, mesure du pH, etc. Même en ayant parfaitement caractérisé le paramétrage de chaque méthode, il peut rester des critères rendant la comparaison difficile, par exemple le fait que le paramétrage des cultures peut dépendre des variétés utilisées, dont la gamme n'est pas la même entre tous les pays. Ou des méthodes d'analyse qui ne sont pas simplement comparables les unes aux autres (comparaison variant suivant le type de sol...).

Une étape intermédiaire peut-être la comparaison des diagnostics et préconisations obtenus par l'application des divers raisonnements à des cas réalistes (c'est à dire correspondant au domaine de définition des méthodes). Cela signifie un parangonnage au sens strict des méthodes sur des cas choisis. Pour cela, la première étape est le choix des cas à tester, la seconde, l'application par les spécialistes nationaux, de leur méthode aux cas choisis. On pourra à la suite de cet exercice comparer les diagnostics et préconisations obtenus.

5.1.1. Définition de cas-type pour comparer le diagnostic et les préconisations

Il est nécessaire de formaliser des cas (successions de cultures, types de sols ...) ayant un sens par grande zone pédoclimatique (blé au Nord Europe, maïs au Sud, ...) avec des valeurs de rendement objectif par-type par zone, des pratiques, etc. ... A titre d'exemple, Jordan-Meille *et al.* (2012)² avaient choisi comme types de sol les plus courants en Europe des sols de plaines fluviales, d'une part, et de dépôts éoliens, d'autre part, et demandé aux différents pays prenant part à l'étude de travailler sur des cultures de blé et de pomme de terre. Ces cas seront à faire valider collectivement par les spécialistes qui seraient impliqués dans l'opération. L'idée est à la fois de couvrir largement le champ des possibles, tout en restant dans des situations assez générales pour être partageables par un grand nombre de participants.

On pourrait pour chaque situation traitée, faire évoluer la gamme de certains paramètres d'entrée (analyse de terre par exemple...) pour étudier dans quelle mesure les préconisations y sont sensibles. Une difficulté sera toutefois d'exprimer les mêmes situations à tester, en utilisant diverses méthodes d'analyse de terre (ou autre variable d'entrée...). Une phase préalable de corrélations entre méthodes analytiques et paramètres descriptifs, doit être menée avec soin. L'impossibilité d'aboutir à ces corrélations peut limiter l'exploration de certains cas.

² An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations. *Soil Use and Management*, 17p, doi: 10.1111/j.1475-2743.2012.00453.x

5.1.2. Résultats des tests

Pour chaque cas (ou gamme de cas) testé, on pourra alors comparer les diagnostics et préconisations obtenus. Cela peut se faire à l'échelle de la culture isolée, ou à l'échelle de la succession de cultures, ce qui aurait sans doute davantage de sens pour les éléments P-K.

On pourra mettre ainsi en évidence les convergences et divergences, ce qui pourrait pointer sur les cas les plus sujets à débat.

Pour bien comparer les méthodes de raisonnement, il serait également nécessaire de connaître dans quelles mesures les préconisations ont été validées par les résultats effectivement obtenus lors de leur application en conditions agricoles réelles : les doses proposées se sont-elles avérées nécessaires et suffisantes ? Les effets environnementaux souhaités se sont-ils bien réalisés ?

La convergence vers des pratiques « majoritaires » n'implique pas forcément que ces pratiques soient les plus pertinentes.

Les cas de préconisation insuffisante sont plus ou moins rapidement indentifiables (pertes de rendement, apparition de symptômes de déficience, ...), ceux de préconisation excessive sont plus difficiles à mettre en évidence. Une telle étude nécessiterait la collaboration de l'encadrement technique agricole de terrain (conseils agricoles et laboratoires de service, coopératives, ...)

5.2. Constitution d'un réseau « fertilisation raisonnée » européen

Afin de partager les résultats de cette première étude, l'étendre et l'améliorer, la constitution d'un réseau « fertilisation raisonnée » européen apparaît souhaitable. Ce réseau serait de toute façon nécessaire pour mener à bien l'opération de parangonnage « sur cas réels » évoquée aux paragraphes précédents et qui est vraiment nécessaire pour une comparaison réaliste des systèmes de raisonnement existants.

Le Comifer peut être tête de pont pour un tel réseau au niveau français. Ce réseau pourrait s'appuyer sur l'EJP Soil pour la validation de sa légitimité et le suivi de sa qualité scientifiques, ainsi que pour l'obtention de financements via des appels à projet européens en garantissant la neutralité des participants.

Un tel réseau européen, à l'image du rôle du Comifer à l'échelle française, peut être le lieu du partage d'expérience et de l'amélioration des pratiques à travers les échanges réciproques pour converger vers plus d'efficacité agricole et d'innocuité environnementale.

Table des figures

Figure 1 : Répartition en 3 classes d'exigences de différentes plantes vis à vis du phosphore, selon les pays enquêtés 26

Figure 2 : Trajectoires des teneurs en P biodisponible du sol en fonction des teneurs initiales visées par les stratégies de fertilisation (d'après le document allemand VDLUFA). Celles-ci s'appuient sur des coefficients multiplicateurs ou additifs des quantités exportées et perdues à l'échelle parcellaire.... 27

Figure 3 : Innovations repérées dans les méthodes européennes de fertilisation P et K..... 28

Tables des Tableaux

Tableau 1 : Postes pris en compte dans le calcul de la dose N à apporter par pays..... 22

Tableau 2: Type de méthode de calcul de la fertilisation azotée..... 23

Tableau 3 : Type d'exigence concernant la réglementation nitrate 23

Tableau 4 : Méthodes d'extraction du P selon les pays 25

Tableau 5 : Méthodes d'extraction du K selon les pays et points communs avec les méthodes P **Erreur ! Signet non défini.**

Références Bibliographiques

ALLEMAGNE

Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 28. April 2020 (BGBl. I S. 846) geändert worden ist

VDLUFA-Standpunkt ; 16.09.1997 ; Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA)

BELGIQUE

REQUASUD, un conseil de fumure raisonné - Le cas du phosphore. Génot et al 2011 (Wallonie)

Le programme de gestion durable l'azote en région wallonne (1er programme d'action, 2002-2006) , C. Vandenbergue et al, 2006

ESPAGNE

Guia Practica de la fertilizacion racional de los cultivos en Espagna (2010) ; Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino

IRLANDE

Major & micro nutrient advice for productive agricultural crops- Teagasc, Juin 2020 ; Teagasc, Johnstown Castle, Environment Research Centre, Wexford.

ITALIE

LINEE GUIDA NAZIONALI DI PRODUZIONE INTEGRATA/2020/sezione tecniche agronomiche Rev. 4 del 26 09 2019

Fertilizzazione bilanciata e avvicendamento. Produzioni agricole integrate. Generalità. Linee guida per la concimazione . Regione Lombardia 2007

LUXEMBOURG

Recueil de législation /Journal officiel du Grand-Duché du Luxembourg 2000 et 2014

PAYS BAS

The science behind the tools, EUROFIN AGRO, ISSPA, 2019

Evolution du statut phosphaté des sols de prairies aux Pays-Bas. Conséquences pour les recommandations de fertilisation, J.A. Reijneveld et O. Oenema, Revue Fourrage 2012

Nutrient management, innovative techniques and nutrient legislation in intensive horticulture for an improved water quality. Books of Abstract, Sept 2013

ROYAUME UNI

Nutrient Management Guide (RB209), 8 edition, Department for Environment, Food and Rural Affairs, June 2010 52p

SUISSE

Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse. Sinaj & Richner PRIF 2017