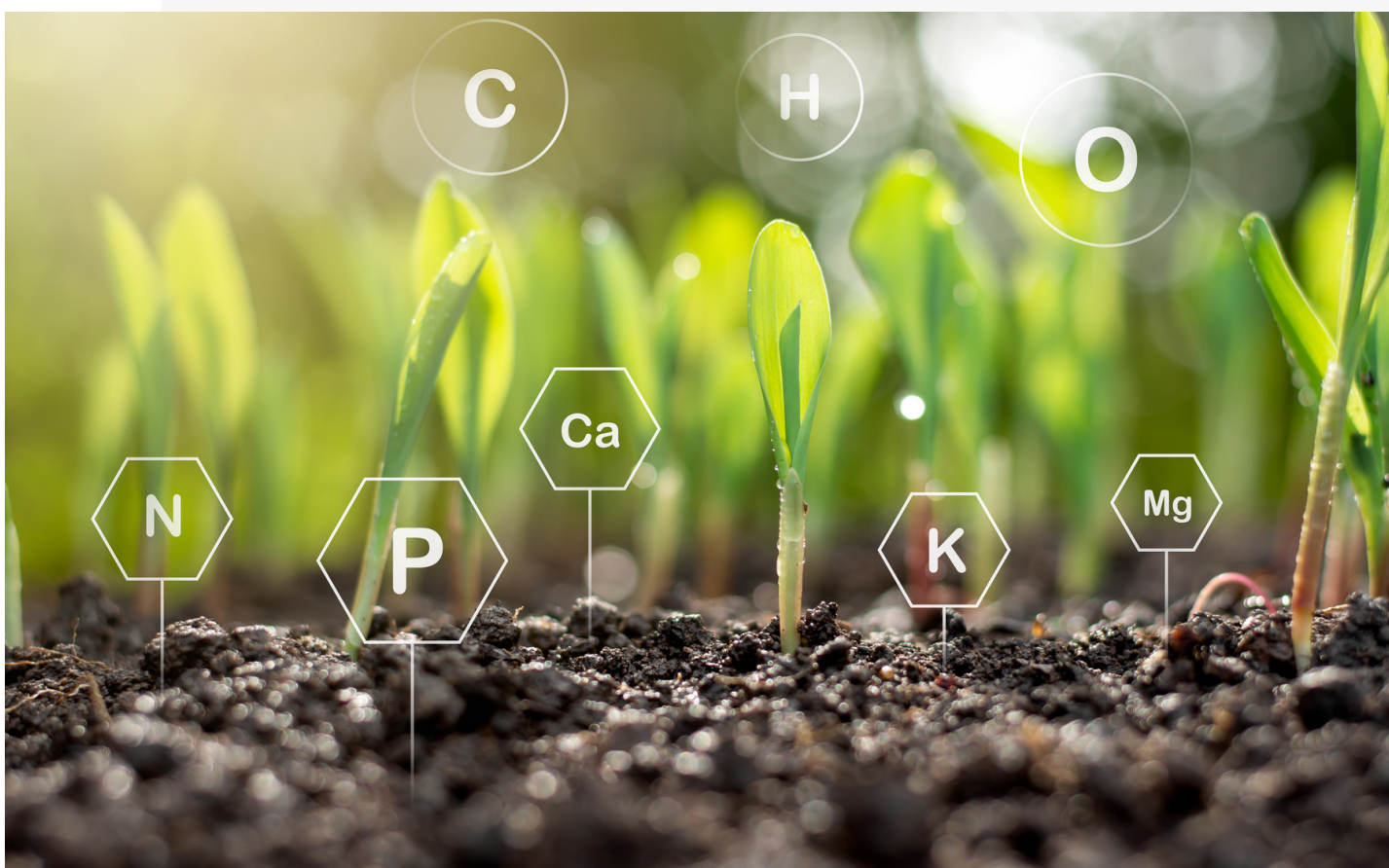


Année de publication 2022

La gestion de la fertilité des sols et de la fertilisation en grandes cultures en Agriculture biologique

Considérations générales et application à la Wallonie



PRÉPARÉ ET PRÉSENTÉ PAR

Le Centre wallon de Recherches agronomiques

Table des matières

1	Introduction	3
2	La gestion de la fertilité en agriculture biologique	5
3	Les éléments fertilisants : les besoins et exportations	8
3.1	Azote.....	8
3.2	Phosphore.....	10
3.3	Potassium	12
3.4	Soufre	12
4	Leviers de gestion de la fertilité du sol en AB	13
4.1	L'intégration de légumineuses dans la rotation :.....	14
4.2	Les couverts d'interculture :.....	15
4.3	Une bonne gestion des résidus de culture :.....	17
4.4	Les apports de fertilisants	18
4.4.1	Engrais organiques du commerce.....	20
4.4.2	Engrais de ferme.....	20
4.4.3	Gestion de la matière organique	22
4.4.4	Résultats d'essais sur la fertilisation organique réalisés sur des céréales en grandes cultures.....	24
5	Conclusions.....	26
6	Pour aller plus loin.....	26
6.1	Solliciter des conseils ou un encadrement.....	26
6.2	Projets relatifs à la fertilité en grandes cultures bio.....	27
7	Bibliographie	29

1.Introduction

Durant le siècle passé, la fertilité des sols a longtemps été réduite à la capacité des sols à servir de support à une production agricole assurée par des intrants extérieurs tels que les engrais et les produits phytosanitaires. Bien que sa fertilité ait été largement décrite sous les angles chimique (analyse de pH, capacité d'échange cationique (CEC), teneurs en carbone et éléments nutritifs) et physique (structure, texture, porosité), la considération du sol comme un simple support inaliénable a conduit, par l'intensification de l'agriculture, à une forte dégradation de ce facteur de production. Les dommages encourus par le sol sont, entre autres Bünemann & al 2018 :

- Une compaction suite à l'utilisation d'engins agricoles de plus en plus lourds ;
- Une dégradation de la structure qui résulte, entre autre, d'un affinage des sols pour la mise en place des cultures sarclées sur butte ;
- Une perte de matière organique (MO) dans les systèmes grandes cultures sans bétail et/ou sans restitution d'autres sources de MO (Goidts, E. & van Wesemael, B., 2007) ;
- Une contamination par des produits phytosanitaires (pesticides ou encore produits de protection des plantes (PPP)) ;
- Une salinisation suite à la mise en œuvre d'une irrigation mal conçue

Ces dégradations conduisent notamment à des phénomènes comme l'érosion (pouvant aller jusqu'à des coulées de boue ou des glissements de terrain), l'accentuation des flux superficiels d'eau et des inondations qui en découlent sans oublier des pertes de productions.

Suite à la conscientisation de ces dégradations, le sol est aujourd'hui considéré comme une ressource naturelle, au même titre que l'air ou l'eau, qu'il y a lieu de maintenir en "bon état" afin qu'il puisse fournir durablement l'ensemble des services attendus, au bénéfice de notre société. Cela transparait également dans la prise en considération d'un troisième angle de description de la fertilité des sols, en plus des angles chimique et physique. En effet, la fertilité biologique, bien que plus complexe à aborder, repose sur l'activité des (micro)-organismes vivants du sol.

À titre d'exemple, le rôle du sol en tant que régulateur des cycles hydriques, de par ses capacités d'infiltration et de rétention de l'eau, est essentiel à l'alimentation des nappes phréatiques et à la régulation des débits des cours d'eau.

Afin que le sol puisse remplir ses différents rôles, dont la production végétale, il y a lieu de maintenir et de gérer sa fertilité de manière adéquate. Bünemann & al (2018) définissent la fertilité des sols comme leur capacité à :

- produire, obtenir un rendement cultural : cette capacité de production est associée à la fourniture des éléments fertilisants : nutritifs et biogènes, qui est la fonction de recyclage de ceux-ci
- réguler le cycle de l'eau (infiltration, ...) qui va impacter le maintien du sol (érosion hydrique) et les risques de lixiviation de polluants
- réguler la santé du sol : dégradation ou immobilisation de composés ou d'éléments toxiques
- contrôler les maladies, parasites et prédateurs

- assurer la fonction d'habitat : le sol est un lieu de vie pour les microorganismes, la mésofaune et la macrofaune
- assurer la fonction de régulation des flux gazeux (O₂, CO₂), de gaz à effets de serre (GES), de composés organiques volatils (COV) et de séquestration du carbone.

Cette fertilité repose sur des propriétés d'état, à la fois sur celles pour lesquelles l'homme a peu ou pas d'emprise telles que la nature du substrat et de la roche mère, la topographie et la climatologie (température, précipitations, albédo) ; et sur celles pour lesquelles l'homme peut agir aux travers du travail du sol et les apports de différents amendements (organiques, calcaires, ...).

Néanmoins, si le sol est un élément clé de la production végétale, il n'est pas le seul facteur à l'influencer. En effet, cette production va également dépendre :

- des facteurs culturaux : le choix des variétés (potentiel de production, résistance aux maladies et parasites), les densité de plantation, le contrôle des maladies et ravageurs, le contrôle des adventices
- de l'application de fertilisants (nature des engrais, quantités, localisation et dates d'épandage)
- des apports éventuels d'eau (irrigation).

Sur base de ces éléments nous proposons de retenir la définition suivante de la fertilité d'un sol : *"La fertilité d'un sol correspond à sa capacité à fournir de bonnes conditions de croissance pour la plante. Elle résulte des processus physiques, chimiques et biologiques qui, ensemble, fournissent les éléments nutritifs, l'eau, l'aération et des conditions stables propices à la croissance des plantes. Des sols fertiles sont également libres de toute substance susceptible d'inhiber la croissance des plantes"* (Stockdale E.A. & al 2002).

Les sols et leur fertilité, avec l'ensemble de ses composantes chimiques, physiques et biologiques, sont des piliers de la production agricole. Il y a donc lieu d'attacher une importance toute particulière à les préserver et à en optimiser la gestion.

2. La gestion de la fertilité en agriculture biologique

L'importance du maintien de la qualité du sol et de la gestion de sa fertilité sont des éléments cruciaux en agriculture ; et en particulier en agriculture biologique (AB). Les processus chimiques, physiques et biologiques impliqués dans la fertilité des sols ne diffèrent pas entre l'AB et le conventionnel. Mais c'est la gestion de la fertilité qui va être fondamentalement différente (Stockdale E. A. & al 2002). La fourniture des éléments nutritifs en AB est beaucoup plus dépendante des processus impliqués dans l'entretien de la fertilité des sols qu'en agriculture conventionnelle (Stockdale E. A. & Watson C. A. 2009). En effet, sur base des règlements européens N°834/2007¹ et N°889/2018, le cahier des charges de l'AB impose des restrictions et des particularités qui sont propres à l'AB, notamment en terme de fertilisation. Biowallonie, structure d'encadrement de l'AB en Wallonie, a édité des documents régulièrement mis-à-jour qui vulgarisent les textes officiels et qui comportent le détail des matières autorisées pour la fertilisation en AB². La restriction la plus importante est l'interdiction stricte de l'utilisation des engrais chimiques de synthèse. Seuls certains engrais minéraux (par exemple des poudres de roches, de la kiesérite, le maërl,...) et les engrais organiques de ferme ou du commerce sont autorisés ; avec toutefois la possibilité de valoriser des pailles ou des engrais de ferme provenant d'exploitations ou d'élevages définis comme « non-industriels » par le cahier des charges. De ce fait, l'agriculture biologique repose plus sur les processus naturels impliqués dans la fertilité des sols et sur une approche à long terme, puisqu'elle ne peut avoir recours aux engrais de synthèse, capables de fournir des éléments nutritifs sous une forme directement assimilable par les plantes. Le sol occupe donc une place centrale dans les agroécosystèmes biologiques : la fraction minérale, les matières organiques, les microorganismes, les - et macrofaunes, les plantes, les animaux et les humains constituent un ensemble complexe et pérenne (Padel S & Lampkin N. 2010, Rusch H.P. 1968).

Au vu des éléments cités ci-avant, l'agriculture biologique s'est initialement et naturellement développée dans les systèmes de polycultures - élevage où les prairies temporaires avec présence importante de légumineuses, en plus des engrais de ferme, permettent d'assurer des apports d'azote pour les cultures de la rotation (Watson C. & al 2002).

Aujourd'hui les systèmes de grandes cultures en AB (non liés à l'élevage) sont en progression. Les premiers se sont développés sous le régime européen du gel des terres (Cormack W.F. 1997), un système de lutte contre les excédents de productions de l'époque en céréales (Floyd 1992, EEC regulations 1765/92 and 1422/97). Les agriculteurs y ont été obligés et soutenus pour retirer des terres de la production alimentaire au profit de cultures énergétiques ou fertilisantes. Ceci s'est traduit en AB par l'implantation de mélanges à base de légumineuses (Clotuche P. & al 1998), des "prairies temporaires" non récoltées, ou des jachères dont les couverts peuvent être laissés sur place et incorporés au sol. Aujourd'hui, le gel des terres n'est plus d'application mais un nombre croissant d'exploitations se développe sans lien direct avec l'élevage. Dans ces systèmes, la gestion de la fertilité des sols et de la fertilisation y est plus délicate que pour d'autres systèmes en AB, Les possibilités d'y inclure des légumineuses en tant que culture principale dans les rotations sont réduites, et d'autre part une meilleure

¹ Qui sera abrogé par le règlement N°2018/848, entrant en vigueur au 1er janvier 2022

² https://www.biowallonie.com/wp-content/uploads/2020/09/2020_09_livret-re%CC%81glementation-bio-productions-ve%CC%81ge%CC%81tales.pdf

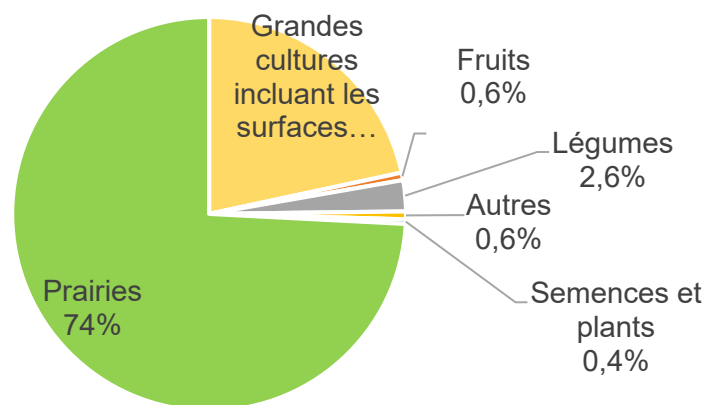
maitrise des cultures pousse les rendements à la hausse, et donc également les besoins en éléments nutritifs.

Importance des grandes cultures dans l'agriculture biologique wallonne (2020)³

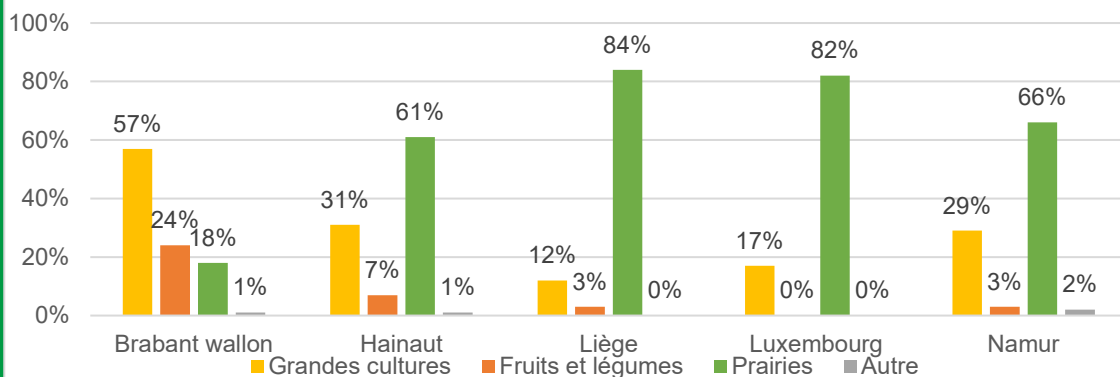
Nombre de ferme bio : 1 901 fermes, soit 85 fermes de plus qu'en 2019 (+ 4%). Au total, environ une ferme wallonne sur 7 (14.3%) est en AB. Les fermes en AB wallonnes représentent plus de 75% du total des fermes AB à l'échelle de la Belgique.

Surface agricole utile bio : 89 951 hectares, soit 5 529 hectares de plus que l'année précédente (+7%). Au total, environ un hectare agricole wallon sur 8 (12%) est consacré à l'AB. À titre de comparaison, la moyenne européenne est de 8,5% et celle de la Flandre est de 1,4%.

Répartition des surfaces cultivées en AB en Wallonie en 2020 (total de 89 951 hectares)



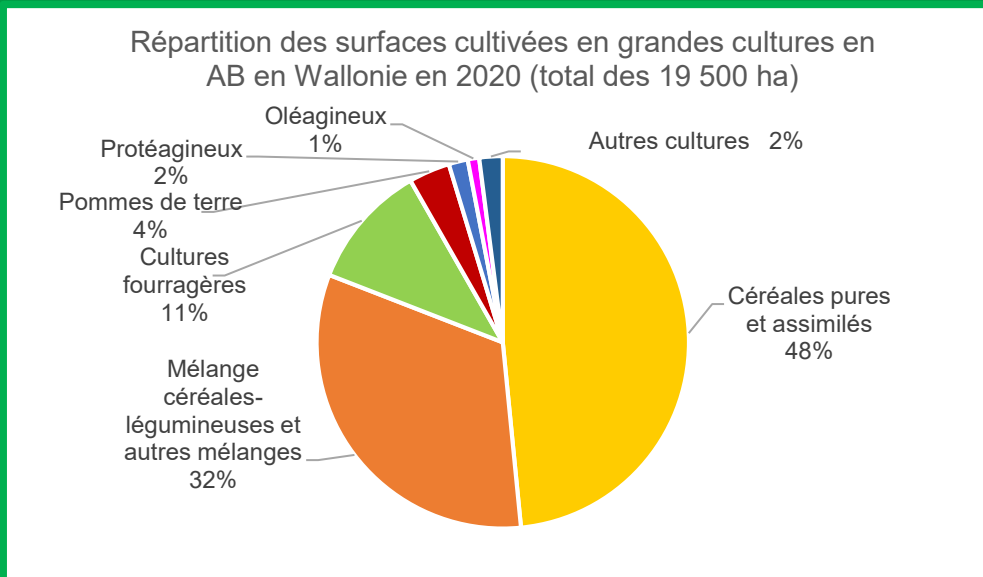
Répartition des surfaces cultivées en AB en Wallonie par province



³ Biowallonie: Les chiffres du bio 2020 Ariane Beaudelot et Antoine Gallez

Gros plan sur les grandes cultures

Depuis 2012, plus de 1.000 nouveaux hectares de grandes cultures sont convertis en AB chaque année. Cette augmentation suit la demande croissante en céréales bio (alimentaires et fourragères). En 2020, les grandes cultures représentent 21,6% de la SAU totale en AB, soit 19500 hectares, dont 3600 ha sont en première ou deuxième année de conversion.



Les céréales et assimilés couvrent une surface de 9430 hectares. Les plus courantes sont dans l'ordre : le froment (2263 ha), l'épeautre (1959 ha), l'avoine (1405 ha), l'orge (1334 ha), le triticale (1199 ha), et le maïs grain (835 ha, forte augmentation en 2019). Les autres sont les quinoa, sarrasin, sorgho, millet et blé dur.

Les cultures en mélange, principalement des cultures céréales-légumineuses, représentent 6.320ha et ont progressé de +32% en 2020 par rapport à 2019. Ces mélanges sont, en majorité, non triés à la moisson et donnés tels quels au bétail. Cependant, certains mélanges sont destinés à l'alimentation humaine, comme le froment panifiable-pois, l'avoine-lentille et l'épeautre-lentille, et dans ces cas, ils sont triés à la récolte.

Les cultures fourragères (2212 ha) regroupent la luzerne (42 %), le maïs ensilage (27 %), les trèfles (8 %) et les autres mélanges fourragers (24 %).

En ce qui concerne les autres grandes cultures, pour les pommes de terre les surfaces fluctuent au gré des prix du marché et restent très limitées. Le nombre de producteurs augmente, et ceux-ci investissent de plus en plus dans des unités de stockage. Notons que les surfaces en protéagineux sont sous-estimées car une partie est comptabilisée dans la mesure agroenvironnementales MB 6 " Culture favorable à l'environnement".

Evolution de la filière bovine : un total de 106000 bovins a été enregistré en 2020, soit 4% de plus qu'en 2019. Le cheptel viandeux est stable tandis que cheptel laitier continue sa progression.

Evolution de la filière porcine : après avoir diminué en 2019, le cheptel porcin bio wallon a augmenté en 2020 et totalise 11 667porcins.

Evolution de la filière avicole : le nombre de poulets continue sa progression (+ 14 % de 2019 à 2020), avec près de 4 millions de poulets (3 909 000). Au total, le nombre de poulets a doublé en 4 ans.

Source : Beudelot A. & Gallet A. M. (2020)

Les chiffres du BIO 2020 – statistiques du bio en date du 31 décembre 2020

<https://www.biowallonie.com/chiffres-du-bio/>

Préalable

La gestion de la fertilité des sols et de la fertilisation en AB font face à de nombreux défis. Nous proposons de faire, au travers du présent document, le point sur cette gestion et sur les réponses à y apporter. Ce livret s'adresse aux personnes averties du secteur mais également aux personnes moins averties de la question mais qui y portent un intérêt.

3. Les éléments fertilisants : les besoins et exportations

Longtemps et jusqu'il y a peu, la gestion de la fertilité des sols et de la fertilisation en AB s'est focalisée sur l'azote, l'élément le plus limitant. Mais aujourd'hui il y a lieu de prendre en compte également d'autres éléments, notamment le phosphore (P), le potassium (K) et le soufre (S).

3.1. Azote

L'azote est souvent le facteur limitant de la production en AB.

Les études sur les bilans des nutriments dans les systèmes de production en AB montrent que la principale source d'azote est celui fixé symbiotiquement (Granstedt A. 1992, Anglade & al 2015) principalement par les légumineuses. À titre d'exemple, dans l'étude d'Anglade & al (2015) sur des fermes en AB du bassin de la Seine (France) où prédominent des rotations de type luzerne (2 ans), céréales (2 ans), colza, légumineuses à graines (lentilles, pois, haricots, fèves) (1 an) et céréales (2 ans), 87 % de l'azote vient de cette fixation symbiotique. Le solde se répartit entre les engrais de ferme et engrais organiques exogènes (6 %) et les dépôts atmosphériques (7%). Dans les systèmes de grandes cultures, l'introduction de légumineuses annuelles à graines (haricot, pois, féveroles, ...), en culture pure ou associée, ainsi que l'introduction de légumineuses dans les couverts d'intercultures ou les couverts de sous-semis chaque fois que c'est possible, constituent donc la principale source d'azote.

Les légumineuses peuvent donc se retrouver dans la rotation sous forme de :

- cultures pluriannuelles (luzerne) ;
- mélanges fourragers (comme trèfles- graminées) dont les prairies temporaires ;
- cultures associées (céréales-pois par exemple) ;
- couverts d'intercultures courts ou longs⁴.

Les cultures fourragères et les prairies représentent la plus grande partie de l'azote fixé. La forte dépendance à ces cultures a longtemps confiné l'AB aux systèmes polycultures- élevage et herbagers. En effet, aujourd'hui encore, les légumineuses à graines n'occupent que des surfaces très faibles (Beudelot A. & Gallet A. M. 2020). À l'inverse, en 2019, les surfaces en prairies représentent 74 % des surfaces cultivées en AB en Wallonie (Beudelot A. & Gallez A. 2020).

⁴ Ces couverts incluent les cultures de service, les CIPAN, ...

L'azote fixé symbiotiquement dans les prairies et cultures fourragères va en très grande partie se retrouver dans les déjections animales puis dans les engrais de ferme et ainsi retourner au sol. Les nutriments (N – P – K – Ca – Mg - S - ...) des engrais de ferme, MO endogènes à l'exploitation agricole, sont à cette échelle un recyclage interne et non une source exogène. Le recours aux sources d'azote exogène à l'exploitation, sous formes de MO est, quant à lui, strictement réglementé (Biowallonie 2020). L'utilisation d'engrais organiques du commerce (autre source d'azote exogène) est, de plus, fortement limitée par leur coût qui reste élevé. La dégradation de ces MO peut être estimée sur base du rapport C/N, tel qu'expliqué ci-dessous.

Rapport C/N - Lien entre azote, carbone et dégradation des matières organiques

Outre son rôle essentiel d'élément nutritif pour la production végétale, l'azote, et plus particulièrement sa teneur comparativement à celle du carbone, est étroitement liée au devenir des différentes formes de matières organiques (MO) dans le sol. En effet, le ratio entre carbone organique total et azote total, rapport C/N, est utilisé comme premier indicateur pour estimer la dégradabilité des MO.

Il permet entre autre d'évaluer l'équilibre entre minéralisation et humification. Les MO à C/N faible se décomposent généralement très vite, libérant de l'azote minéral et autres éléments nutritifs, tandis que celles à C/N élevé sont plus récalcitrantes, se dégradent lentement et vont au contraire immobiliser de l'azote. Malgré son utilité évidente, ce paramètre présente certaines limites. Il ne tient pas compte de la diversité des composés du carbone et de l'azote présents dans le sol. Pour le carbone par exemple, des composés à décomposition rapide comme les sucres sont comptabilisés au même titre que des lignines à décomposition beaucoup plus lente. De plus, ce rapport C/N peut être faussé au cours du compostage par l'incorporation de minéraux⁵ au fumier ou de terre. Dès lors, d'autres indicateurs spécifiques, comme l'indice de stabilité de la MO (ISMO), ont été développés.

La difficulté majeure de la fertilisation azotée en AB réside dans le fait de faire coïncider les besoins d'azote des cultures et la libération d'azote par la minéralisation de la MO présente dans les sols. La minéralisation dépend fortement de la température du sol, en décalage avec celle de l'air qui oriente les besoins des plantes. Toutes les stratégies de fertilisation azotée doivent répondre à ce défi. La disponibilité de l'azote fixé est donc une question cruciale, particulièrement en céréales, où un des défis à relever est de fournir l'azote sous une forme minéralisée, absorbable par le système racinaire, de manière synchrone avec la cinétique des besoins en azote des céréales en cours de saison de croissance, car ceux-ci ne correspondent pas la plupart du temps aux périodes de minéralisation active des matières organiques.

⁵ Certains de ceux-ci comme les algues calcaires, maërl, lithotamme, les phosphates naturels, ... contiennent des carbonates (et donc du C minéral).

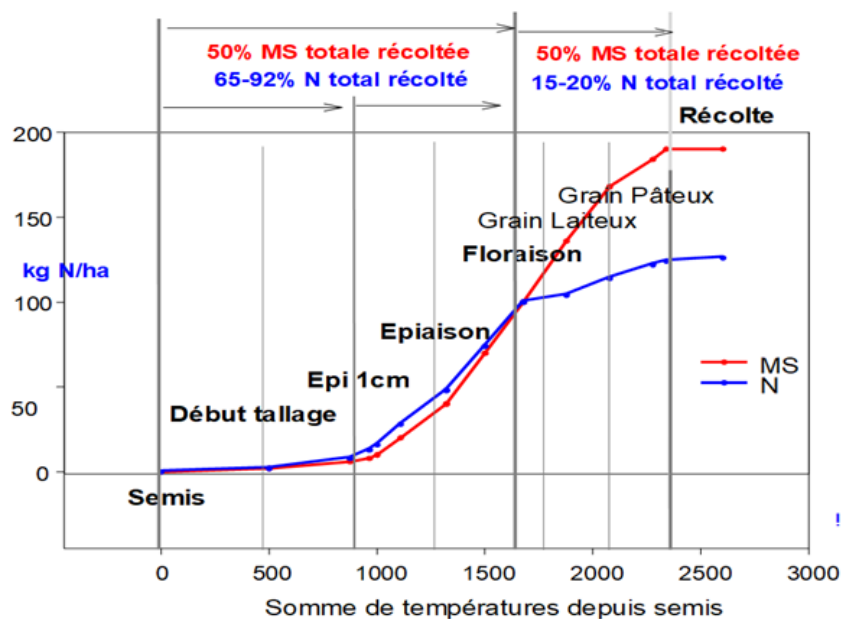


Figure 1 : Cinétique d'absorption de l'azote au cours du cycle de développement et de croissance du froment (Alvarez G. & al 2003)

Ce besoin d'azote en fin d'hiver est très important pour le tallage, pour le démarrage de croissance et la compétition avec les adventives (figure 1). Il s'agit clairement d'un facteur qui a été et est encore souvent limitant de la production céréalière en AB. À cette période de l'année, la température du sol est trop basse pour l'activité des microorganismes nitrifiants. La minéralisation des matières organiques du sol, et donc les disponibilités en azote minéral pour couvrir les besoins sont donc trop faibles. Cela vaut aussi pour les apports de fumier composté avant semis, dont moins de 10 % de l'azote va se retrouver dans la plante, et qui d'un point de vue nutrition azotée, sont une très mauvaise pratique (Alvarez G. & al 2003, Thomsen I. & al 2001). D'où le recours éventuel à des engrais organiques du commerce, à action plus rapide.

Pour d'autres cultures de la rotation, celles dont le cycle de développement est plus tardif (carottes de conservation, les poireaux d'hiver, les céleris raves, ...) leurs périodes de besoins élevés en azote correspondent mieux aux moments de la minéralisation de la MO du sol et des engrais organiques à action plus lente comme les fumiers compostés, et des arrières effets des apports organiques. Un complément de fertilisation avec des engrais organiques du commerce peut être apporté à la plantation pour assurer un meilleur départ de croissance, et des besoins qui ne sauraient être couverts par les antécédents (intercultures, apports organiques, ...).

3.2. Phosphore

Plusieurs études dont des synthèses portant sur des milliers d'observations (Cooper J. & al 2018, Reimer M. & al 2020) mettent en évidence une nette tendance déficitaire des bilans P en AB. Cette tendance déficitaire est attribuée aux réglementations et cahiers des charges de l'AB qui restreignent fortement la liste des sources utilisables de P, et à la faible disponibilité du P de ces sources. La situation bilantaire déficitaire en P est particulièrement critique dans les systèmes en AB en grandes cultures (Nowak B. & al 2013a, 2013b) qui pointent qu'avec

l'amélioration des techniques culturales les rendements des céréales en AB ont fortement augmenté. Soulignons également que la carence en P peut entraîner une réduction de la fixation de l'azote par les légumineuses (Walker L. & al 2006) et impacter dès lors l'alimentation du système en azote.

La gestion du P en AB doit donc relever 3 défis :

- l'équilibre du bilan pour une durabilité à long terme,
- une mobilisation du P présent et,
- le recyclage interne du P présent.

La résolution du premier défi passe notamment par l'utilisation des sources exogènes de P. Les sources exogènes autorisées en bio sont essentiellement les phosphates naturels⁶, obtenus par broyage des roches.

Engrais, amendements du sol et nutriments minéraux autorisés - apports de phosphore (Biowallonie, 2020) :

Phosphate naturel tendre (teneur en cadmium inférieure ou égale à 90 mg/kg de P205)

Phosphate aluminocalcique (teneur en cadmium inférieure ou égale à 90 mg/kg de P205, utilisation limitée aux sols basiques (pH>7,5))

Scories de déphosphoration

Le phosphate naturel, le principal engrais phosphaté autorisé, est sous une forme peu disponible, il est dès lors intéressant de l'apporter dans la rotation avant les cultures ou intercultures. Certains auteurs ont également proposé de l'apporter aux déchets végétaux mis à composter (Walker L. & al 2006) pour que le P de ces poudres de roche soit assimilé par les microorganismes ou chélaté par des acides organiques produits en cours de compostage. Des essais réalisés en Wallonie en 1991 (Godden B. & al) avec addition au fumier au moment de la mise en andain avaient conduit à un accroissement des dégagements d'azote ammoniacal; le phosphate naturel étant très basique (très alcalin). L'addition de phosphate naturel en cours de compostage, au retournement de l'andain permet d'éviter cet écueil (Duthoit B. 2017).

La résolution du deuxième défi passe par l'utilisation de cultures (principales ou d'interculture) développant des mycorhizes ou d'autres mécanismes actifs d'absorption du P du sol présent sous des formes peu accessibles (Kamh M. & al 1999).

La résolution du troisième défi passe par une attention particulière au recyclage du P présent et à l'évitement des pertes, vu la faiblesse relative des entrées de P en AB. Plusieurs études montrent que des pertes en P se produisent lors du dégel de couverts implantés comme CIPAN (Aronsson H. & al 2016, Liu J. & al 2019). Elles se font essentiellement par ruissellement et non par lixiviation (comme pour le nitrate). Et il convient donc d'incorporer rapidement au sol les couverts gelés pour éviter ces pertes qui, faut-il le rappeler, conduisent à l'eutrophisation des eaux de surface. L'utilisation d'espèces gélives est souvent préconisée pour l'implantation des couverts d'interculture que ce soit en AB ou par ceux qui ne veulent

⁶ Principalement sous forme d'apatites (exemple hydroxy-apatite $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}(\text{OH})_2$)

pas ou ne peuvent recourir aux herbicides. Rappelons que la destruction mécanique des couverts d'interculture par broyage - gyrobroyage et/ou labour sont également possibles.

3.3. Potassium

Le potassium est un élément important dans la fertilité des sols. Les quantités exportées par les cultures sont considérables, en particulier pour les "cultures racines" (pommes de terre, betteraves, carottes, ...). En AB, les bilans de cet élément nutritif sont fréquemment déficitaires en particulier, mais pas uniquement, dans les systèmes sans élevage (Gosling P. and Shepherd M. 2005). En outre dans les sols à faibles CEC, comme les sols sableux, des pertes de K par lixiviation sont observées (Askegaard M. & al 2003, Gosling P. and Shepherd M. 2005). Ce déficit en K peut alors devenir limitant en AB, s'il n'est pas compensé.

Les engrais de ferme constituent au sein de la ferme la principale source de K. Les engrais de ferme importés et les engrais organiques du commerce à base de produits d'origine animale ou de vinasses en sont une possible source exogène à l'exploitation.

Les autres engrais potassiques utilisables en AB sont repris dans l'encart ci-contre. L'engrais potassique le plus utilisé est le patenkali (sel de sulfate de potassium).

Engrais, amendements du sol et nutriments minéraux autorisés en AB - apports de potasse (Biowallonie, 2020) :

Sel brut de potasse ou kaïnite

Sulfate de potassium pouvant contenir du sel de magnésium (produit obtenu à partir de sel brut de potasse par un procédé d'extraction physique et pouvant contenir également des sels de magnésium)

Vinasse et extraits de vinasse (à l'exclusion des vinasses ammoniacales)

3.4. Soufre

Le soufre devient un élément fertilisant à gérer suite à la nette diminution des retombées atmosphériques. Il faut à la fois boucler le bilan (les apports moins les exportations et les pertes) et la disponibilité par les plantes. Une des difficultés vient du manque de données, cet élément ayant été peu dosé.

Par contre, les processus de mobilisation du soufre ont fait l'objet de quelques études qui mettent en évidence l'intérêt de certaines plantes en ce y compris d'interculture pour mobiliser cet élément (Couëdel A. & al 2018, Churka Blum S. & al 2013).

Les principaux engrais soufrés utilisables en AB sont la kaïnite ($\text{KMg}(\text{SO}_4)\text{Cl}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$), le patenkali (K_2SO_4) et l'Haspargit⁷.

⁷ Produit dérivé des vinasses de sucrerie.

4. Leviers de gestion de la fertilité du sol en AB

En AB, la fertilité et sa gestion reposent sur le sol, sur son fonctionnement avec une priorité aux MO sous toutes leurs formes, complétées par des matières minérales brutes insolubles (sauf sels de potassium) pour lesquelles la mobilisation passe par l'activité biologique, ce qui peut se résumer par : **"Nourrir le sol pour nourrir la plante"**.

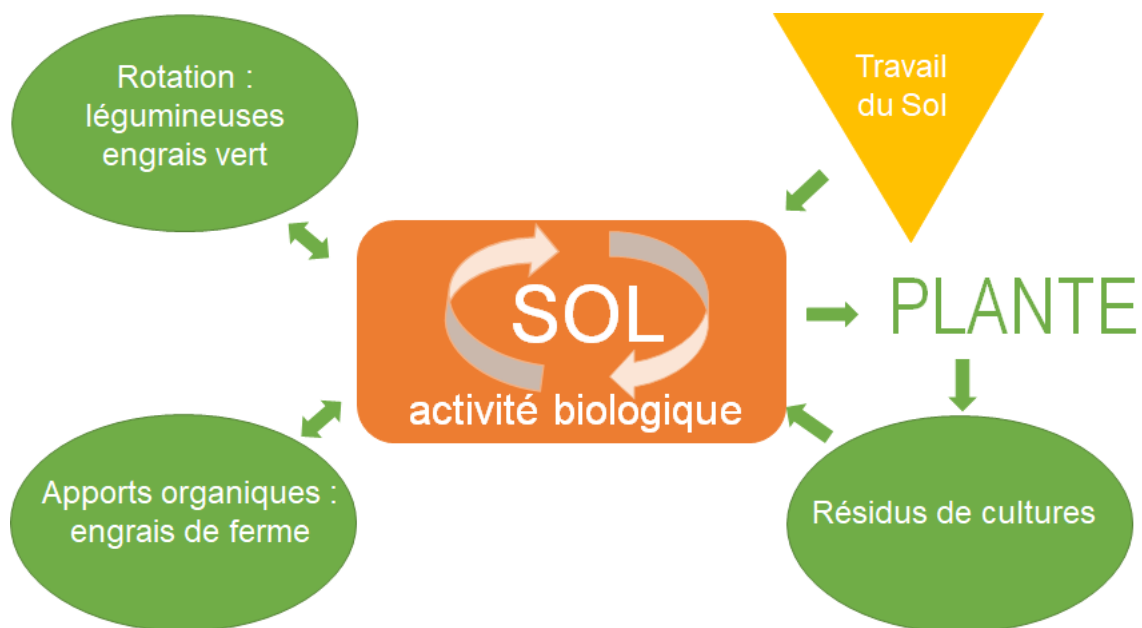


Figure 2 : Nourrir le sol pour nourrir la plante

Différents leviers sont utilisés au sein de l'itinéraire cultural pour apporter les éléments fertilisants au sol et améliorer la fertilité dans toutes ses composantes (Figure 2) :

- l'intégration de légumineuses dans les rotations,
- les couverts d'intercultures,
- une bonne gestion des résidus de cultures de la rotation,
- les apports de fertilisants, endogènes (engrais de ferme produit sur l'exploitation) et exogènes (engrais de ferme importés, fertilisants minéraux, engrais organique du commerce (EOC)).

4.1. L'intégration de légumineuses dans la rotation

Les rotations en AB doivent être réfléchies afin de prendre en compte tous ces leviers pour maintenir et gérer de manière optimale la fertilité des sols. Elles sont également une des clés de voûte pour gérer différentes problématiques de la conduite des cultures en AB, comme l'illustre la Figure 3.

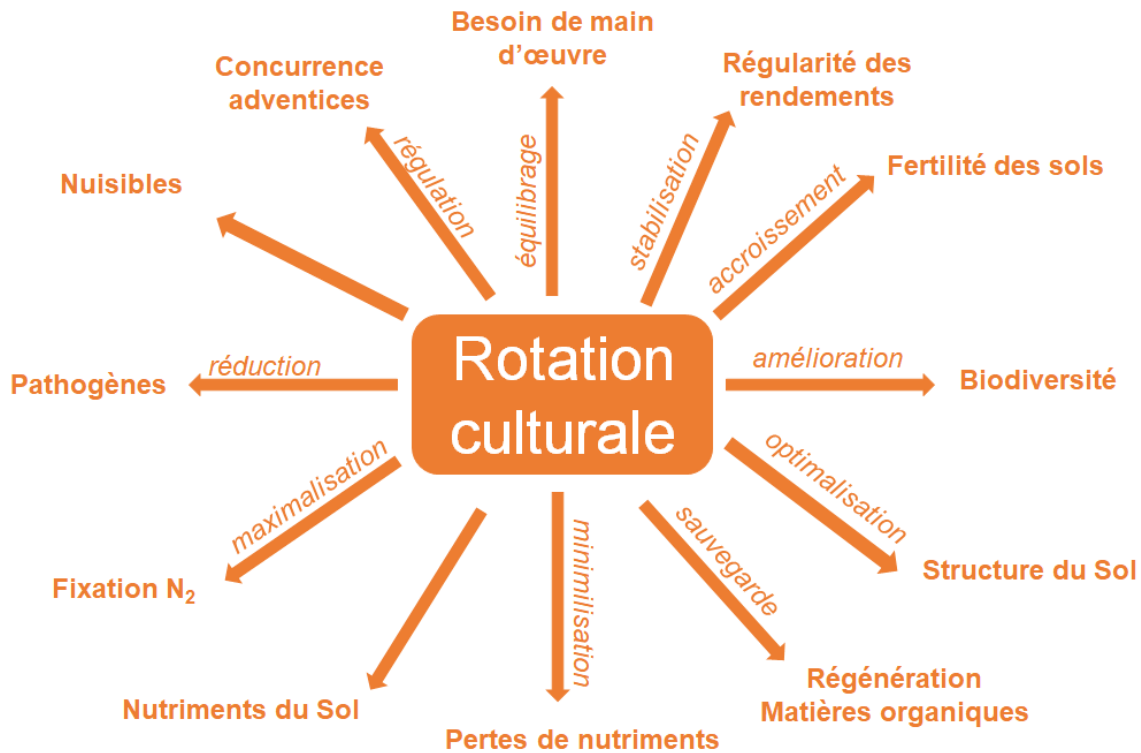


Figure 3 : Fonctions d'une rotation culturale orientée de façon optimale (traduite d'après Köpke U. 1999)

Leur construction doit être pensée en prenant en compte les composantes de la Figure 3 mais aussi des besoins des différentes cultures qui en feront partie. Ainsi, la rotation se doit d'assurer un équilibre entre les cultures qui "construisent" la fertilité et celles, souvent de rente, qui la "consomme" (Watson C. & al 1997). L'intégration de cultures de légumineuses apparaît donc comme essentielle dans l'apport de fertilité.

Dans les systèmes de grandes cultures non liés à l'élevage, l'élaboration des rotations est délicate car les possibilités d'y inclure des légumineuses en tant que culture principale sont réduites (à l'inverse des systèmes de polyculture-élevage qui peuvent facilement intégrer des prairies comprenant des légumineuses). Cela passe donc par l'introduction de légumineuses annuelles à graines (haricots, pois, féveroles, etc), en culture pure ou associée, et par ailleurs, des légumineuses chaque fois que c'est possible dans les couverts d'interculture ou les couverts de sous-semis. L'intérêt de cultures associées, telles que des cultures mixtes céréales-légumineuses à graines est rehaussé par le développement des techniques de triage post-récolte et de nouveaux débouchés. En Wallonie, le développement du secteur de la transformation de légumes de plein champ est un facteur de développement de ces systèmes en permettant la présence des nombreux légumes (légumineuses et légumes racines). Les rotations des systèmes légumiers sont donc fortement induites par les impératifs du secteur

de la transformation en vue d'assurer des débouchés et une bonne valorisation des productions. De manière générale, les rotations en AB doivent intégrer d'un côté, les impératifs d'une bonne gestion de la fertilité de leur sol et de l'autre, les impératifs d'une bonne valorisation de leurs productions ; ce qui rend complexe la définition des rotations.

4.2. Les couverts d'interculture

L'implantation de couverts végétaux dans les itinéraires techniques culturaux et les rotations répond à plusieurs préoccupations qui ont évolués au cours des années comme la fixation d'azote pour la culture suivante ou la lixiviation des nitrates. Des préoccupations complémentaires telles que la lutte contre des parasites et prédateurs, la production de fourrage ou la fertilisation pour d'autres cultures de l'assolement sont venues s'y ajouter. Leurs intérêts et fonctions sont nombreuses, si bien qu'un nouveau vocable est apparu : les Cultures Intermédiaires Multi-Services (CIMS). Le nombre d'espèces mobilisables pour l'implantation de couverts d'interculture est de plus en plus large. Il existe de très nombreux guides techniques (en format écrit⁸ ou sous forme d'OAD⁹) afin de définir les mélanges à planter. De plus en plus souvent, des mélanges interspécifiques sont implantés afin de bénéficier des caractéristiques et des avantages propres à chacune des espèces. En agriculture biologique, on veillera notamment à l'apport d'éléments fertilisants (principalement l'azote) que l'interculture peut fournir à la culture suivante de la rotation en y incorporant des légumineuses.

Au sein des légumineuses, les quantités d'azote que celles-ci peuvent fixer diffèrent fortement (Büchi L. & al 2015). Certaines, comme les vesces, gesses, pois ou fèves, ont la capacité de fixer jusqu'à 160 kg N/ha pendant la période d'interculture (Tableau 1). Parmi les trèfles, sur base de ces résultats, le trèfle incarnat a, avec une fixation de 60 à 90 kg N/ha, la plus grande capacité de fixation. Au niveau des rapports C/N, les lupins se distinguent des autres espèces par un C/N beaucoup plus élevé. La présence limitée dans le tableau de plantes non légumineuses (avoine et phacélie) démontre l'intérêt des légumineuses dans l'apport d'azote au système.

⁸ Notamment : https://wiki.tripleperformance.fr/images/7/76/Guide_couvert_vegetaux_janv_2017-1.pdf

⁹ Notamment : <https://protecteau.be/fr/cipan>

Tableau 1 : Quantités d'azote fixées et biomasse produites par diverses espèces pendant l'interculture (d'après Büchi L. & al 2015¹⁰)

Espèce	Biomasses	N fixé	N total plante	C/N
	t/ha	kg /ha	kg /ha	
Légumineuses				
soja	3,4 à 4,8	4 à 55	60 à 143	16 à 24
gesse	3 à 4	100 à 150	130 à 160	10
lentille	2,2 à 3,2	<u>50 à 80</u>	67 à 108	13,5
lupin	4,7 à 5,6	9 à 40	60 à 88	27 à 37
luzerne	2 à 2,3	30 à 60	60 à 83	13,7
mélilot	1,6 à 1,7	33	54	13,7
pois	4,5 à 5,5	109	139 à 166	13,7
trèfle Alexandrie	3,2	35 à 60	78	18
trèfle incarnat	3,26	<u>60 à 90</u>	97	14,5
trèfle violet	1,5	36	50	13,2
trèfle blanc	1,2	32 à 47	36 à 58	11,3
trèfle de Perse	2,4	46 à 65	74	14,2
trèfle souterrain	1,6	19 à 43	43 à 59	14
fèverole	6,27 à 7,45	130 à 170	170 à 200	16,8
vesce commune	3,5 à 4,4	120	143 à 176	10,3
vesce velue	3,6 à 4,3	100 à 160	135 à 160	10,2
Non légumineuses				
avoine	3,6 à 4,8		38 à 68	33 à 40
phacélie	5,3		55 à 74	35,7

La capacité de prélever l'azote minéral présent (reliquat de fertilisation) ou produit par la décomposition des MO (du sol, des résidus de cultures, des apports organiques, ...) est grandement lié aux espèces implantées et au développement de biomasse du couvert. Les espèces comme les crucifères, les graminées et la phacélie captent très efficacement l'azote minéral du sol. Les légumineuses sont moins efficaces et ne prélèveront que 40 à 60% de l'azote disponible, voire moins pour les vesces (Tosti G. & al 2014). Il est donc primordial d'associer les légumineuses avec d'autres espèces, car en mélange, la capture de l'azote minéral est équivalente à celle observée dans les mélanges sans légumineuses (Tosti G. & al 2014, De Toffoli M. & al 2013).

¹⁰ La distinction N fixé (N dérivé de l'azote atmosphérique) vs N total des plantes a été réalisée par utilisation de ¹⁵N. Les essais ont été réalisés sur 2 sites, dont les teneurs en Nmin au moment de l'implantation des couverts étaient de 78 et 124 kg N min/ha.

Le développement de la biomasse va lui dépendre de nombreux facteurs :

- la durée de développement qui est fonction de :
 - la date de semis et donc de la date de récolte de la culture précédente et des techniques mises en œuvre pour l'implantation du couvert ;
 - des caractéristiques des espèces : vitesse intrinsèque de croissance, résistance à la sécheresse ou au froid. Certaines espèces sensibles au manque d'eau seront affectées pendant la période de fin d'été. Pour d'autres, c'est la sensibilité aux basses températures qui risque d'affecter leur période de développement, mais une sensibilité au froid, au gel peut aider à leur destruction. Pour des intercultures plus longues la capacité à surmonter, à passer l'hiver est un facteur important.
- la présence de nutriments (reliquat azoté; soldes de fumures et arrières effets de fertilisations organiques; minéralisation de la MO du sol et des résidus de la culture principale précédente) ;
- les apports organiques avant implantation ;
- le pouvoir concurrentiel des espèces vis-à-vis des adventices ;
- les conditions météorologiques.

Les couverts d'interculture jouent également un rôle dans la gestion des autres éléments fertilisants. Les crucifères sont régulièrement utilisées car elles ont la capacité de mobiliser le soufre (Couëdel A. & al 2018) et le phosphore (Hunter P. J. & al 2014) par divers mécanismes liés à leur rhizosphère. Notons qu'il est déconseillé d'associer crucifères et légumineuses en raison de la production par les premières, de composés allélopathiques soufrés pouvant se transformer en isothiocyanates, puissants biocides (Couëdel A. & al 2018, Couëdel A. & al 2017). D'autres plantes comme le sarrasin (une polygonacée capable de mobiliser du P inaccessible pour les autres cultures (Teboh J. M. & al 2011)) et la phacélie (possède une capacité de mobiliser des nutriments comme le potassium, et un fort développement de mycorhizes) sont également régulièrement utilisées. Soulignons que le rôle exact des couverts d'interculture dans la réduction des risques de pertes du P est plus complexe. En effet, lorsqu'ils gèlent, ces couverts peuvent libérer du P organique avec des risques de transfert vers les eaux de surface par ruissellement (Liu G. & al 2019).

Le choix des couverts et de leur composition peut avoir aussi de multiples effets tant sur la fertilité (fixation d'azote, captation de l'azote minéral résiduel, amélioration de la structure du sol, mobilisation d'éléments fertilisants par des espèces à mycorhizes, gestion du taux de matière organique) que sur la lutte contre les adventices par l'inclusion d'espèces présentant des propriétés allélopathiques anti-adventices (par exemple l'avoine), ou par une densité végétale étouffante pour les adventices.

4.3. Une bonne gestion des résidus de culture

Les résidus de culture peuvent également être considérés comme un apport d'éléments fertilisants. Leur gestion, principalement via le travail du sol, n'est pas à négliger. Ils peuvent être de deux types : obligés (matières végétales non récoltables comme les racines et les chaumes de maïs) ou facultatifs (matières végétales qui peuvent être exportées comme les pailles de céréales).

Résidus obligés : Les cultures laissent au sol des quantités de matières végétales non récoltables (parties souterraines comme les racines et partie de surface partiellement incorporée comme les chaumes). Elles sont très rarement quantifiées et caractérisées. Pour des cultures comme les céréales et le maïs, la proportion des résidus obligés représente entre 4 et 7% de la biomasse totale produite (Katterer & al 1993). Cela peut représenter jusqu'à 5,5T/ha pour des céréales dans certains systèmes (Bertrand I. & al 2011, 2013). Contrairement aux céréales dont la biomasse souterraine est très faible tout au long du cycle de développement des plantes, les plantes de couverts "fourragers", graminées et légumineuses ont une biomasse racinaire qui peut atteindre jusqu'à 4 à 5 TMS/ ha. En cultures de légumes les masses de résidus frais laissés au sol varie de 10 à 60 T MF/ ha selon les espèces (10 T pour des laitues, 14 pour des haricots, 17 pour les épinards, 40 T pour les céleris raves, et de 40 à 60 T pour les choux) (Salomez J. & al 1995, Agneessens L. 2014). Cela représente de 10 à 25 kg N/ ha pour les petits légumes jusqu'à plus de 150 pour les choux (Agneessens L. 2014). Le système de culture (conventionnel, intégré ou biologique), par le niveau de fertilisation, influence la proportion de racines par rapport à la biomasse des parties aériennes. La fertilisation réduit cette proportion : généralement, plus les cultures reçoivent d'engrais moins elles développent leurs racines.

Résidus facultatifs : Il s'agit essentiellement des pailles de céréales; pour les cultures traditionnelles ces MO sont bien connues et des informations sont disponibles dans diverses publications¹¹. De manière générale, la quantité de pailles produites est similaire à la quantité de grains récoltés. Il est toutefois à noter que des différences peuvent apparaître entre variétés.

Le travail du sol va permettre d'incorporer ces résidus. Une partie de cet azote fixé peut être perdu si ce matériel végétal est laissé en surface ou mal incorporé (production d' N_2O , puissant gaz à effet de serre) (Li X. & al 2015 et 2017 au Danemark). L'incorporation superficielle, plus encore si elle est progressive (les passages aèrent le sol et réduisent l'anaérobiose), et un labour léger permettent de réduire très fortement ces émissions et donc ces pertes. La décomposition de ces résidus va être très fortement fonction de leur rapport C/N et de leur teneur en lignine (De Neve S. & al 1994, Trinsoutrot I. & al 2000). Le travail du sol va aussi permettre d'améliorer la structure du sol et de jouer un rôle dans le désherbage. Tous ces facteurs peuvent jouer un rôle important dans la fertilité des sols, tant du point de vue physique, chimique, biologique que sanitaire (les résidus de culture non décomposés peuvent être vecteurs de maladies fongiques et être le site de prolifération d'insectes)

4.4. Les apports de fertilisants

Conséquences d'une meilleure maîtrise des cultures (contrôle des adventices, itinéraires techniques, ...), des augmentations de rendements ont été observées ces dernières années. Tel qu'illustré dans le Tableau 2, les plantes exportent d'importantes quantités de P, K et Mg. De ce fait, les bilans en éléments fertilisants des systèmes de grandes cultures montrent des déficits annuels cumulés en ces éléments (Cooper J. & al 2018, Reimer M. & al 2020, Nesmes B. & al 2012, Ohm M. & al 2017), déficits que l'on peut étendre aux autres éléments biogènes.

¹¹ Notamment en annexe 19.2 de la référence : Sinaj, S. (2009). Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages (DBF- GCH). Revue Suisse d'Agriculture 41(1):1-98
<https://www.researchgate.net/publication/286633945> Donnees de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages DBF-GCH

Tableau 2 : Exportations en élément P, K et Mg par unité de récolte de quelques cultures (Denoroy P. & al 2019)

Espèce	Partie récoltée de la plante	% MS	Unité de teneur	Exportation par unité récoltée		
				P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
Blé	grain	85	kg/q	0,65	0,5	0,12
	paille	88	kg/t	1,7	12,3	0,85
Fèverole	grain	86	kg/t	1,2	1,3	0,23
Pois fourrager	grain	85	kg/q	0,8	1,15	0,18
	paille	88	kg/t	2,1	19	2,05
Pommes de terre de consommation	tubercule	20	kg/t	0,95	3,9	0,3
Pois de conserve	grain	25	kg/t	2,95	4	0,7
Carottes grosses	racines	12	kg/t	1,0	5,5	0,23
Haricot vert	gousse	10	kg/t	1,05	3,65	0,45
Poireau d'hiver	fût et feuilles	11	kg/t	0,8	4,2	0,2

Dès lors, certains engrais et amendements minéraux, dont quelques-uns furent cités lorsqu'il était précédemment question des éléments fertilisants, peuvent être utilisés en AB dans le but d'équilibrer le bilan entrées-sorties sur la rotation et de pourvoir aux demandes importantes, notamment avant des cultures racines ou tubercules qui sont connues pour être de grandes exportatrices de potassium.

En plus de ces apports exogènes de fertilisants minéraux tels que définis dans le cahier des charges en AB, la gestion du carbone et plus largement de la MO constituant un enjeu majeur, il est également permis d'avoir recours à certains engrais organiques, du commerce ou de ferme. Cette utilisation s'effectue toujours dans le respect de la réglementation en vigueur dans le domaine de l'AB. Une vulgarisation de cette réglementation, reprenant notamment des tableaux avec toutes les matières fertilisantes autorisées et régulièrement mis-à-jour, est disponible sur le site de Biowallonie¹².

Attention

Dans les sols riches en un élément, certaines plantes ou cultures absorbent plus de cet élément que nécessaire. On parle alors de consommation de luxe. Ainsi, par exemple, la betterave est une "pompe à sodium et potassium. Dans ce cas, la fertilisation peut être inférieure aux exportations réelles à la parcelle. Il faut dès lors se référer aux besoins d'exportation sur une base plus large, et parfois mettre une limite, celle à partir de laquelle commence la "consommation de luxe".

Ceci est valable pour le K, le P et dans une certaine mesure pour le N comme pour la pomme de terre par exemple.

¹² https://www.biowallonie.com/wp-content/uploads/2020/09/2020_09_livret-re%CC%81glementation-bio-productions-ve%CC%81ge%CC%81tales.pdf

4.4.1. Engrais organiques du commerce (EOC)

Les EOC, apports exclusivement exogènes, sont composés de farines animales (de sang, viande, plumes, poils, cornes, onglets, poissons, cuirs, ...) ou d'origines végétales (coques de cacao, tourteaux divers, vinasses, digestats, ...) parfois traités à hautes pressions et hautes températures ou mécaniquement afin de les rendre aisément décomposables dans le sol et ainsi libérer rapidement les éléments fertilisants qu'ils contiennent. Ils se caractérisent par des rapports C/N très bas (< à 7) et sont très vite minéralisés.

La question de l'intérêt d'apporter ces engrais organiques du commerce en céréales en AB est souvent posée. Elle est posée à la fois d'un point de vue agricole en ce qui concerne le rendement et la qualité, et d'un point de vue économique puisque ces engrais ont très souvent un coût élevé. De plus, ils soulèvent également une question éthique de par l'origine de leurs constituants (Nowak, B. & al 2013a, 2013b). Ils semblent à ce jour échapper aux restrictions des nouvelles réglementations européennes. Rappelons toutefois que dans les états membres, les régions sont libres d'appliquer des restrictions plus strictes que ce règlement européen et ce qui est déjà le cas dans les pays scandinaves de l'EU.

4.4.2. Engrais de ferme

Les animaux rejettent des quantités importantes d'éléments fertilisants dans leurs déjections. Ainsi, chez les bovins, ces déjections contiennent ± 70 % de l'azote et du phosphore ingérés et ± 90 % du potassium (Farruggia A. 1999).

Lorsqu'elles sont émises en stabulation en bâtiment d'élevage, ces déjections forment, avec les litières éventuellement rajoutées, les fertilisants organiques appelés engrais de ferme.

Les types et compositions d'engrais de ferme produits dépendent de l'espèce animale considérée, des modes d'hébergement (stabulations), des modes d'élevage et de l'alimentation du bétail. En effet, l'alimentation, propre à l'exploitation, la région et la période de l'année, influence fortement les compositions. À titre d'exemple, les teneurs en protéines, et par conséquent en azote, de l'herbe varient tout au long de la saison, ce qui se répercute sur la composition des déjections animales et des engrais de ferme correspondants.

Dès lors, il est conseillé d'analyser ses engrais de ferme, en prenant le plus grand soin lors du prélèvement de l'échantillon qui doit être représentatif¹³.

Bien que non spécifique à l'AB, le tableau 3 illustre la composition moyenne de certains types d'engrais de ferme.

¹³ https://centredemichamps.be/wp-content/uploads/2020/11/Analyse_engrais_ferme_comment_realiser_un_bon_echantillon_v4.pdf

Tableau 3 : Composition de quelques engrais de ferme (Cugnon T. 2018)

Catégories de produits	MS (%)	Nt (Kg/T MF)	NH ₄ (Kg/T MF)	P ₂ O ₅ (kg/T MF)	K ₂ O (kg/T MF)
Bovins					
Fumier composté	24	5,9	0,3	4,1	8,7
Fumier	22,8	6,1	0,6	3,6	8,5
Lisier	7,2	3,5	1,6	1,4	3,8
Purin	1,8	1,3	0,5	0,2	3,3
Porcins					
Lisier	7,4	6,1	3,6	3,1	4,5
Volailles					
Fumier de volaille	48,4	23,4	3,7	14,3	16,7

En ce qui concerne le volume de production d'engrais de ferme, il y a de fortes fluctuations en fonction du niveau d'ajout de litières pour les fumiers, et des apports d'eaux (eaux blanches, eaux vertes et brunes¹⁴) pour les lisiers.

Les cheptels de volailles bio en Wallonie sont passés respectivement de 910.683 poulets de chair et 33.596 poules pondeuses à 3.434.831 et 470.715 en 2019 (A. Beudelot et M. Mailleux, Les chiffres du bio, Biowallonie 2019). D'après les estimations réalisées avec l'aide de R. Boutsen (Biowallonie), cela conduit à environ 43.000 tonnes de matière fraîche de fumiers de volailles en 2019.

Les engrais de ferme, des fumiers provenant d'élevage bovins ou porcins bio ou conventionnels non industriel si tant est que respectant les règles du Cahier des charges bio (Biowallonie 2020) en passant par les fientes encore de volailles bio, constituent une source intéressante de matière organique dans les systèmes de grandes cultures.

Les engrais de ferme peuvent être utilisés bruts ou après stockage ou traitements à la ferme. Ces traitements sont, notamment, le compostage des fumiers ou, pour les lisiers, la dilution, la séparation des phases solides et liquides ou la digestion anaérobie pour la production de biogaz.

Gros plan sur le compostage de fumier

Contexte : Le compostage est un processus aérobie de biotransformation de matériaux organiques, qui comprend une phase thermophile, c'est-à-dire une montée en température.

Processus de compostage : Le processus de compostage démarre avec l'incorporation d'air au fumier par passage dans l'épandeur travaillant à poste fixe ou dans le retourneur d'andains. Le volume de l'andain de fumier en est pratiquement doublé. Cette aération, l'aérobiose ainsi créée, va stimuler la prolifération des microorganismes aérobies qui métabolisent les sucres et conduisent à une production de chaleur. Lors du compostage des fumiers, l'essentiel des transformations se déroule pendant les 4 à 5 premières semaines. Il n'est dès lors pas nécessaire d'attendre plusieurs mois avant de le valoriser.

But principal : Assainissement du fumier, à la fois pour se débarrasser des pathogènes et des graines d'adventices.

¹⁴ eaux de lavage des installations de traites, des eaux de nettoyage des aires bétonnées ou pluviales

Paramètres à suivre :

- Température : manifestation la plus perceptible du compostage, enclenché par la prolifération de microorganismes aérobies libérant de la chaleur lors de l'oxydation des sucres et hydrates de carbone du fumier
- Aération : permet aux microorganismes d'être actifs. L'anaérobiose entraîne la formation de composés réduits dégageant de mauvaises odeurs.
- Humidité : essentielle au développement des microorganismes mais entraînant l'anaérobiose lorsqu'en excès. Ne pas tomber sous le seuil de 40-50%
- Structure : déterminant, nécessité de matériaux suffisamment pailleux dans la composition du fumier
- Rapport C/N : rapport de 23 à 25 considéré comme optimal pour assurer un bon compostage en limitant les risques de perte d'azote ammoniacal lié à un C/N trop faible

Pour aller plus loin : Luxen P., Godden B. et Rabier F. (2012) *Le compostage des fumiers, une technique de valorisation des matières organiques en agriculture*. Les Livrets de l'agriculture n° 20 SPW 45 p

Leclerc, B. (2001). *Guide des Matières Organiques*. Tome 2, 90 p Eds ITAB

Leclerc, B. (2014). *Document de mise à jour du Guide des Matières Organiques*. 1–32.

Gros plan sur les lisiers

Stockage : dépendant du système d'hébergement des animaux :

- Caillebotis : stocké sous les animaux
- Couloirs de raclage : stocké en dehors des bâtiments d'élevage

Traitements : destinés à éviter les désagréments liés à l'accumulation de gaz toxiques sous la croûte de surface formée suite à la sédimentation du lisier.

- Brassage : au mixer ou à la pompe de recyclage
- Aération : en insufflant de l'air dans le lisier
- Méthanisation
- Dilution : par des eaux blanches, brunes ou vertes afin d'augmenter la fluidité
- Séparation de phase : par pression à vis et tamis vibrant

Epanchages : Différents systèmes se substituent au traditionnel tonneau défecteur vers le haut, tels que les systèmes :

- à patins
- à gouttières métalliques
- à injection couplée à des disques
- à dents rigides

Pour aller plus loin : Godden B. et Luxen P. (2015) *Les engrais de ferme : les lisiers*. Les Livrets de l'agriculture 71 p <http://www.agraost.be/doc/livretlisier2015pdf.pdf>

4.4.3. Gestion de la matière organique

L'efficacité des MO dépend fortement des conditions de leur utilisation.

Tout d'abord, la culture de destination, celle pour laquelle la MO est apportée, joue un rôle important. Pour maximiser l'utilisation de l'azote fourni par la minéralisation des MO, il faut que les périodes de minéralisation coïncident avec ou précèdent légèrement celles des prélèvements par les plantes. La connaissance de ces paramètres est essentielle pour une bonne gestion des MO. Un essai a été réalisé durant les années 1998 et 1999 afin de juger de l'intérêt d'apporter du fumier composté avant un blé d'hiver, tel que pratiqué en agriculture

biologique (Alvarez G. & al 2003). Les résultats obtenus ont montré que les périodes de besoins en azote des céréales et de minéralisation de l'azote du fumier composté ne correspondent pas. Aussi, la céréale a subi une carence azotée irréversible identique à la situation des parcelles témoins, dès la montaison. Finalement, la part de l'azote du fumier composté absorbé par la céréale est inférieure à 5 % mais un pourcentage conséquent (+ 20 %) de cet azote se retrouve dans la biomasse microbienne, qui a prélevé ce qui a été minéralisé après la période de prélèvement par la céréale. Ces résultats ont pu être confirmés par des essais menés au Danemark (Thomsen I. 2001), où 4% de l'azote de fumier composté a été retrouvé dans la céréale. Dans d'autres essais (Godden B. & al 2007), les arrières effets de différents types de fumiers (mou, pailleux et composté) apportés à un maïs ont été quantifiés sur une culture de froment qui lui faisait suite. Dans ces essais, ce sont de 18 à 30 % de l'azote apporté par le fumier composté qui se retrouvent dans la céréale. Pour le compost, l'arrière effet est très supérieur à la fourniture d'azote observée l'année qui fait suite à son application. Cet exemple illustre parfaitement combien il est important de choisir les cultures fertilisées avec les MO.

La quantité de MO apportée impacte également l'efficacité de l'apport. D'après un essai de Godden B. & al. (2007), non spécifique au bio maïs permettant d'illustrer l'effet de ce paramètre dose, réalisé entre 2001 et 2004 sur une rotation de maïs, froment, avoine en tant que CIPAN, betteraves sucrières et pommes de terre, l'efficacité des engrais de ferme est nettement plus élevée pour les doses plus faibles (80 kg N/ha), et décroît avec l'augmentation des apports (120 et 155 kg N/ha). De telles observations ne sont pas spécifiques aux conditions de l'AB.

La date de l'apport est un autre élément influençant l'efficacité. En culture, les apports de printemps ont des efficacités bien supérieures à celles observées suite à des apports d'automne. Pour les céréales cultivées en AB, au vu de la vitesse de minéralisation des matières organiques, il faut appliquer la totalité de la dose d'engrais en une seule application à la reprise de végétation, contrairement à la pratique qui consiste à appliquer l'azote en deux à trois fractions (Abrams M. & al 2020).

Finalement, il y a également lieu de prêter attention à d'autres facteurs tels que la gestion des stockages et la portance des sols.

4.4.4. Résultats d'essais sur la fertilisation organique réalisés sur des cultures de céréales en grandes cultures en AB

Tel que cela a déjà été mentionné, le besoin d'azote des céréales en fin d'hiver est un facteur essentiel qui a été et est encore souvent limitant de la production céréalière en AB. D'où le recours aux engrais organiques du commerce ainsi qu'à certains engrais de ferme à action rapide.

Des essais ont été réalisés de 2016 à 2019 par le CRA-W, CPL Végémar¹⁵ et le CARAH sur plusieurs sites d'essais en Wallonie et avec divers itinéraires techniques (tableau 4), et ce dans le but d'évaluer l'efficacité de divers engrais, mais aussi leur impact sur la qualité du grain et leur rentabilité économique.

Tableau 4 : Principales caractéristiques des parcelles des quatre années d'essai (Abrams M. & al 2020)

Froment	Chièvres		Horion		Nethen		Rhisnes	
	Précédent	Reliquat 0-90 (30-60-90) (kg N/ha)	Précédent	Reliquat 0-90 (30-60-90) (kg N/ha)	Précédent	Reliquat 0-90 (30-60-90) (kg N/ha)	Précédent	Reliquat 0-90 (30-60-90) (kg N/ha)
2016					Féverole	18 (7-6-5)		
2017			Oignons	71 (15-31-25)				
2018	Maïs	56 (17-16-22)	Pomme de terre	50 (8-13-29)			Pois	31 (7-7-17)
2019	Couvert Spontané	88 (28-33-27)	Haricots	45 (6-11-28)			Pois	75 (5-23-47)

Tableau 5 : Matières fertilisantes testées de 2017 à 2019 dans les essais (Abrams M. & al 2020).

Matière	Fournisseur	Composition	N	P	K	2017	2018	2019
Biomass	Walagri	Hydrolysats de fourrures et de cuir	12,5	0	0		x	
Bouchon 10/6/0	Scam	Poudres de viande, d'os et farine de plume	10	6	0			x
Digestat	BHG	Digestat liquide	0,5	0,2	0,3	x	x	x
Fumier de poules ¹	Exploitation bio	Fumier de poules d'élevage ³	1,6-2,1	1,3-2,7	1,4-1,7	x	x	x
Fumier de poulets ²	Exploitation bio	Fumier de poulet de chair d'élevage ³	1,9-2,7	0,8-1,2	0,9-1,6		x	x
Orgamine 7	Fayt-Carliier	Guano, algues, farine de plumes, vinasse, patenkali	7	5	2	x	x	x
Vinasse	Pomagro	Fermentation de la mélasse, co-produit de la betterave	3,3	0,2	0,8	x	x	x

¹ Pour les essais de Horion et Rhisnes

² Pour les essais de Chièvres

³ composition variable

Les vinasses utilisées dans ces essais sont des vinasses dépotassées contrairement aux vinasses d'origine française notamment. Ces dernières sont également vendues en Wallonie, et se retrouvent comme ingrédient dans des EOC.

¹⁵ Essais actuellement poursuivis par le CPL Végémar.

Les conclusions suivantes ont pu être tirées sur base des résultats obtenus :

- Les itinéraires techniques, en particulier le précédent cultural a une influence déterminante sur le rendement (que l'on observe par les témoins non fertilisés), suivi de l'effet des apports de matières organiques réalisés en cours de la rotation. Ainsi, des précédents légumineuses annuelles (pois, haricot, féveroles, ...) conduisent à des rendements déjà importants que les différents EOC apportés n'améliorent que peu ou modérément.
- Parmi les EOC testés, la vinasse et les digestats conduisent à l'augmentation de rendement la plus forte, suivis de l'Orgamine 7. L'effet des fumiers et fientes de volaille est plus variable, tout comme leur composition selon le producteur (taux de litière et donc C/N par exemple selon les conditions d'élevage des volailles). Ces deux EOC, qui conduisent un accroissement le plus élevé du rendement, ont également un effet positif sur la teneur en protéines des céréales (Abram M. & al 2020a, 2020b).
- Le rendement économique rejoint notre premier point, les EOC ne sont en général réellement intéressants économiquement que dans les situations "pauvres", avec précédent non légumineuses, qui plus est, s'il a eu des rendements élevés et donc de fortes exportations de nutriments. Et toujours en raison du coût élevé de ces EOC, ces apports ne sont rentables qu'à des doses assez faibles (de 60 à 100 unités N/ha); le gain économique diminuant avec le coût et la dose.

Ces résultats rejoignent les enseignements de C. Glachant et C. Aubert (2015), qui avaient souligné que l'apport d'EOC en céréales n'apportait un gain > à 50 € /ha de marge brute que dans 50 % des situations répertoriées, et avait dès lors mis en avant la nécessité d'identifier les situations favorables à l'efficacité et à la rentabilité de ce type d'apports (Billy L. 2008).

Ils en avaient tiré un outil d'aide à la décision Décid-org¹⁶ (Glachant C. 2015a, 2015b) permettant de savoir dans quels cas un apport d'engrais organique est économiquement intéressant.

Dans d'autres essais similaires, les fumiers et fientes de volailles ont eu des rendements pondéraux et économiques positifs (Gilhou R. 2017 : essais en Vendée de 2011 à 2016 cités dans Hélias R. 2020). Vu la grande diversité des produits et de leur composition, on peut en conclure des divers essais (Hélias R. 2020, Glachant C. & al 2020) que tous ont des effets plus ou moins marqués selon les situations principalement selon le précédent cultural. Des gains en protéines sont possibles, plus ou moins importants selon les produits, les conditions locales et l'année climatique.

Les gains économiques sont eux toujours influencés par le précédent et aussi très fortement par le coût des engrais organiques, du commerce ou de ferme, là aussi les prix peuvent varier fortement.

Pour être complet, des essais ont récemment été réalisés (Glachant C. & al 2020) avec des apports de phosphore et de soufre. Les résultats sont parfois déjà positifs en première année mais la réponse des cultures de céréales à ces deux éléments se marquera surtout à moyen et long terme.

¹⁶ Outil de prévision de l'efficacité de l'azote organique (sol et engrais) pour décider de fertiliser ou non le blé biologique au printemps (Glachant C. 2015)

5. Conclusions

Les nombreux essais d'apports d'engrais organiques illustrent clairement qu'il est illusoire de vouloir baser la production en AB, y compris les céréales, sur les seuls apports exogènes. La présence de légumineuses dans la rotation (comme précédent, interculture ou même en culture associée ou en sous-semis) est essentielle.

Il faut veiller à bien gérer l'incorporation des résidus végétaux pour éviter toute pertes d'éléments (azote, phosphore), et tirer profit au maximum de cet accroissement de fertilité.

Pour les céréales, des apports de fumier composté avant semis, ne permettent pas de fournir suffisamment d'azote assimilable à la culture, moins de 10 % de l'azote du compost se retrouvant dans la plante. C'est donc d'un point de vue nutrition azotée une très mauvaise pratique.

Pour les autres grandes cultures pratiquées en AB, celles à cycle de développement plus tardif valorisent mieux l'azote provenant de la matière organique du sol, des engrais de ferme apportés et des couverts végétaux incorporés. L'intérêt des apports d'engrais du commerce est là aussi fort dépendant du précédent cultural (culture, interculture) et des apports d'engrais de ferme. Dans les situations favorables, il peut se limiter à un apport modéré à la plantation pour assurer un bon démarrage de la croissance.

Au niveau de la rotation, il faut veiller à équilibrer les bilans des éléments fertilisants minéraux (P, K, S, Ca, Mg, ...) afin de garantir la fertilité à terme (court, moyen et long). Des apports exogènes, engrais minéraux (ceux autorisés dans les cahiers des charges) et/ ou d'engrais de ferme en provenance d'autres exploitations, peuvent alors être alors nécessaires.

6. Pour aller plus loin

6.1. Solliciter des conseils ou un encadrement

L'asbl **Biowallonie** est la structure de référence pour l'encadrement de l'Agriculture Biologique en Wallonie. Un accompagnement est proposé aux producteurs, en AB ou en conversion, sous forme de conseils personnalisés, des formations ainsi qu'une diffusion d'informations sur des techniques innovantes, notamment via la revue « Itinéraires BIO ».

Plus d'infos : <https://www.biowallonie.com/>

Le **CPL Végémar** s'intéresse à une large gamme de productions végétales et maraîchères. Pour chacune des cultures, les missions du CLP-VEGEMAR sont l'expérimentation agronomique, l'encadrement technique, et l'accompagnement dans différentes démarches de certification.

Plus d'infos : <https://www.provincedeliege.be/fr/node/255>

6.2. Projets relatifs à la fertilité en grandes cultures bio

Plateforme longue durée grande culture en AB au CRA-W (2018-2030) (financement CRA-W)

Pour répondre notamment à l'enjeu de la gestion de la fertilité du sol au sein des exploitations en grandes cultures sans élevage en AB, une plateforme grandes cultures en AB a été mise en place au sein du CRA-W depuis 2018. Deux systèmes différents, basés sur des rotations de 7 ans, ont été établis : un système autonome et un système "ABC (Agriculture Biologique et de Conservation)". Ils seront comparés à un système considéré comme référence qui est caractérisé par un outillage de désherbage performant et une fertilisation azotée basée sur le recours à des apports exogènes.

<https://www.cra.wallonie.be/fr/plateforme-grandes-cultures-bio>

MicroSoilSystem (2018-2024) (financement SPW ARNE)

La première triennale de ce projet avait pour mission de déterminer les conditions du milieu (facteurs pédo-climatiques) et les pratiques agricoles (travail du sol, rotation, intrants phytosanitaires, ...) favorables au développement des champignons mycorhiziens à arbuscules capables d'améliorer la nutrition du froment, notamment en phosphore, par relation symbiotique.

<https://www.cra.wallonie.be/fr/microsoilssystem>

SoilVeg (2015-2018) (financement européen)

Soilveg a optimisé et diffusé de nouvelles stratégies de gestion des couverts végétaux visant à améliorer la qualité des sols et l'utilisation des ressources énergétiques dans les systèmes de production de légumes biologiques, dans le but de préserver la fertilité des sols.

<https://www.cra.wallonie.be/fr/projet-soilveg-premiers-enseignements-des-essais-europeens-a-mi-parcours>

<https://projects.au.dk/coreorganicplus/research-projects/soilveg/>

SOLAB - FERTILITE DES SOLS (2009-2011) (financement CAS DAR, co-financements et auto- financements)

Le projet SolAB a porté sur la gestion des sols et son impact sur la fertilité dans les systèmes de production végétale.

http://itab.asso.fr/programmes/solab.php?request_temp=solAB

FertilCrop - Fertility Building Management Measures in Organic Cropping Systems (2015-2017) (financement européen)

Ce projet, initié dans le cadre du projet ERA-Net CORE Organic Plus, a abordé divers sujets en liens avec les techniques de gestion durable des cultures d'un point de vue de la fertilité, et notamment le cycle du carbone et de l'azote.

<https://www.fertilcrop.net/fc-home-news.html>

Byggro - Improving barley yields in organic stockless farming systems through innovations in green manure management (2008-2014)

Ce projet Norvégien a porté sur la culture d'orge et l'augmentation des rendements de cette dernière, et ce en passant par des innovations dans la gestion des engrais verts.

<https://www.nibio.no/prosjekter/byggro-improving-barley-yields-in-organic-stockless-farming-systems-through-innovations-in-green-manure-management>

CASDAR RotAB (2008-2010)

L'objectif du projet était d'évaluer et de concevoir des rotations pratiquées dans les systèmes spécialisés en grandes cultures biologiques, avec une importance donnée à l'évolution de la fertilité du milieu.

<http://itab.asso.fr/programmes/rotation.php>

CASDAR InnovAB (2014-2017)

Ce projet s'est intéressé à la conception de systèmes de grande culture innovants en AB, à leur caractérisation et à l'évaluation de leurs performances. Il s'appuie sur un réseau d'expérimentations de longue durée évaluant des systèmes de grande culture en AB, le Réseau RotAB, avec l'analyse des impacts de ces systèmes sur l'évolution de la fertilité des sols comme l'un des 3 objectifs de ce projet.

<http://itab.asso.fr/programmes/re-projet-innovab.php>

Abréviations	
AB	Agriculture biologique
C/N	Ratio carbone total sur azote total, indicateur de la dégradabilité des MO
CARAH	Centre pour l'Agronomie et l'Agro-industrie de la Province du Hainaut
CEC	Capacité d'échange cationique
CIMS	Cultures Intermédiaires Multi-Services
CIPAN	Culture intermédiaire piège à nitrates
CPL Végémar	Centre provincial liégeois de Productions végétales et maraîchères
COV	Composé organique volatile
CtRab	Cellule transversale de recherches en agriculture biologique du CRA-W
CRA-W	Centre wallon de Recherches agronomiques
EOC	Engrais organique du commerce
GES	Gaz à effets de serre
K	Potassium
MO	Matière organique
N	Azote
P	Phosphore
PPP	Produit de protection des plantes
S	Soufre

7. Bibliographie

Abras M., Godden B., Legrand J., Stalport A. et Mahieu O. (2020)
Fertilisation des céréales en agriculture biologique : synthèse de 4 années d'essais
Itinéraires Bio 48-52

Abras M., Godden B., Legrand J., Stalport A. et Mahieu O. (2020)
Fertilisation des céréales en agriculture biologique
Livre Blanc "Céréales" – Février 2020 9/1- 9-15

Agneessens, L., De Waele, J. & De Neve, S. (2014).

Review of Alternative Management Options of Vegetable Crop Residues to Reduce Nitrate Leaching in Intensive Vegetable Rotations. (December).

Agronomy 2014, 4, 529-555 <https://doi.org/10.3390/agronomy4040529>

Alvarez G, Destain JP, L'Homme G, Vassal N, et Godden B (2003)
Amélioration de la qualité des blés tendres en agriculture biologique

- Anglade, J., Billen, G., & Garnier, J. (2015). Relationships for estimating N₂ fixation in legumes: incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe. *Ecosphere*, 6(3), 1-24.
- Aronsson H., Hansen E., Thomsen I., Liu J., Øgaard A., Känkänen H., and. Ulén B. (2016) The ability of cover crops to reduce nitrogen and phosphorus losses from arable land in southern Scandinavia and Finland
Journal of soil and water conservation 71, 1, 41-55
- Askegaard M. and Olesen J. (2003)
Exchangeable potassium and potassium balances in organic crop rotations on a coarse sand
Soil use and management 19.2, 96-103
- Aubert C. et Glachant C. (2015)
Grandes cultures biologiques en Ile-de-France Gestion de l'azote sur blé : Décid-org
Chambre d'Agriculture de Seine et Marne 20 p
- Beudelot A. & Mailleux M. (2020)
Les chiffres du BIO 2019 – statistiques du bio en date du 31 décembre 2019
<https://www.biowallonie.com/wp-content/uploads/2020/06/Le-bio-en-chiffre-2019.pdf>
- Bertrand I., Lashermes G. & Recous S. & 2011
Importance des parties souterraines des plantes sur les cycles couplés C et N
COMIFER 17 p
<https://comifer.asso.fr/fr/evenements/rencontres-precedentes/rencontres-2017.html?id=25>
- Bertrand I. 2013 La qualité des litières végétales : impact sur leurs modalités de décomposition dans les sols et les dynamiques carbone et azote. thèse : 99 p
<https://hal.inrae.fr/tel-02804674>
- Billy L. (2008)
Mise en place d'un outil de gestion de l'azote pour le blé tendre en système de grandes cultures biologiques en zone Centre
Mémoire de fin d'études d'ingénieur ENITA de Clermont-Ferrand 68 p
- Biowallonie 2020
Productions végétales : réglementation bio 38 p
- Büchi, L., Gebhard, C. A., Liebisch, F., Sinaj, S., Ramseier, H., & Charles, R. (2015). Accumulation of biologically fixed nitrogen by legumes cultivated as cover crops in Switzerland.
Plant and Soil, 393(1–2), 163–175
- Bünemann EK, Bongiorno G, Bai Z, Creamer RE, De Deyn G, de Goede R, Flesskens L, Geissen V, Kuyper TW, Mäder P, Pulleman M, Sukkel W, van Groenigen JW, Brussaard L (2018) Soil q Bünemann EK, Bongiorno G, Bai Z, Creamer RE, De Deyn G, de Goede R, Flesskens L, Geissen V, Kuyper TW, Mäder P, Pulleman M, Sukkel W, van Groenigen JW, Brussaard L (2018) Soil quality—a critical review. *Soil Biol Biochem* 120:105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
uality—a critical review. *Soil Biol Biochem* 120:105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Churka Blum, S., Lehmann, J., Solomon, D., Caires, E. F., & Alleoni, L. R. F. (2013). Sulfur forms in organic substrates affecting S mineralization in soil.
Geoderma, 200–201, 156–164
- Clotuche, P., Godden, B., Van Bol, V., Peeters, A., & Penninckx, M. (1998). Influence of set-aside on the nitrate content of soil profiles.
Environmental Pollution, 501–506.
- Cooper, J., Reed, E. Y., Hörtenhuber, S., Lindenthal, T., Løes, A. K., Mäder, P., Möller, K. (2018). Phosphorus availability on many organically managed farms in Europe.
Nutrient Cycling in Agroecosystems, 110(2), 227–239
- Cormack W.F. 1997

Testing the sustainability of a stockless arable rotation on a fertile soil in Eastern England. in *Ressource Use in Organic Farming, Proceedings of the third European Network for Scientific Research Coordination in Organic Farming (ENOF)* J. Isart & J.J. Llerena Eds LEAAM-CID-CSIC Barcelona 127-136

Couëdel A., Seassau, C.; Duval, R.; Wirth, J.; Alletto, L. (2017). Des Cultures Intermédiaires Multi-Services pour une production agroécologique performante.

Couëdel A., Alletto L., and Justes E. (2018)

Crucifer-legume cover crop mixtures provide effective sulphate catch crop and sulphur green manure services
Plant & Soil 426(1–2), 61–76

Cugnon Thibaut (2018)

La base de données centralisée de REQUASUD, un outil incontournable pour des informations fiables
<https://www.requasud.be/wp-content/uploads/2018/06/5-BDD-REQUASUD-Exploitation-Valorisation-T.Cugnon.pdf>

De Neve S, Pannier, J., & Hofman, G. (1994). Fractionation of vegetable crop residues in relation to in situ N mineralization. *Eur. J. Agron.*, 3(4), 267-272.

De Toffoli M., Decamps C. et Lambert R. (2013)

"Évaluation de la capacité de cultures intermédiaires à piéger l'azote et à produire un fourrage",
Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, 17, numéro spécial 1, 237-242

Denoroy P., Jordan-Meille L., et Sagot S. (2019)

La fertilisation P – K – Mg Les bases du raisonnement.
COMIFER Groupe P K, 40 p

Duthoit B. (2017)

Influence de l'incorporation de Phosphate Naturel dans un compost sur la disponibilité en Phosphore : Dispositif expérimental en exploitation agricole
Mémoire de fin d'études UCL 110 p

Farruggia, A. (1999) Raisonner les effluents d'élevage

La gestion des engrais de ferme 2ièmes rencontres FARRE p 9-14

Floyd W. (1992)

Political aspects of set-aside as policy instrument in the European Community, in *set-aside*, BCPC Monography n°50, 450-459

Glachant C. (2015)

Gérer les apports d'engrais organiques sur le blé biologique au printemps : Présentation d'un outil d'aide à la décision
Tech & Bio 23 et 24 septembre 2015, 16 p

Glachant C. et Aubert C. (2015)

Gestion de l'azote sur blé tendre biologique en Ile-de-France
COMIFER Actes des 12ièmes rencontres Présentation 18 p

Glachant C. et Aubert C. (2015)

Gestion de l'azote sur blé tendre biologique en Ile-de-France
COMIFER Actes des 12ièmes rencontres article 16 p

Glachant C., Bacle B., Baudoin R., et Capron C. (2020)

Essais fertilisation en AB Soufre et azote, Récoltes 2019 et 2020
Chambre d'agriculture Ile de France Bulletin technique 26 p

Godden B., Dewerchin F., et Penninckx M. (1991)

Projet de recherche et développement en agriculture biologique Région Wallonne -ULB Rapport final 78

Godden B., Destain JP and Luxen P. (2007)

Efficiency and recovery of different cattle manure applied on arable crops in rotation. Proceedings of the 16 th International CIEC Symposium "Mineral versus organic fertilizers: conflict or synergism" pp

Godden B. et Luxen P. (2015)

Les engrais de ferme : les lisiers. Les Livrets de l'agriculture 71 p
Goidts, E., van Wesemael, B., 2007. Regional assessment of soil organic carbon changes under agriculture in Southern Belgium (1955-2005). *Geoderma* 141, 341–354.

Gosling P. and Shepherd M. (2005)
Long-term changes in soil fertility in organic arable farming systems in England, with particular reference to phosphorus and potassium
Agriculture, Ecosystems and Environment 105 (2005) 425–432

Granstedt, A. (1992)
Case studies on the flow and supply of nitrogen in alternative farming. I. Skilleby-Farm 1981–1987. *Biological Agriculture & Horticulture* 9, pp. 15–63.

Hansen S., Berland Frøseth R., Stenberg M., Stalenga J., Olesen J., Krauss M., Radzikowski P., Doltra J., Nadeem S., Torp T., Pappa V., and Watson C.A. (2019)
Reviews and syntheses: Review of causes and sources of N₂O emissions and NO₃ leaching from organic arable crop rotations
Biogeosciences, 16, 2795–2819, 2019

Hélias R. (2020)
Webinaire Arvalis Mise en place de couverts en agriculture biologique 25/11/2020.

Hélias R. (2020)
Fertilisation NP sur céréales pailles : synthèses des essais
Webinaire Arvalis : Fertiliser les grandes cultures en AB 18 novembre 2020

Hunter, P. J., Teakle, G., & Bending, G. D. (2014).
Root traits and microbial community interactions in relation to phosphorus availability and acquisition, with particular reference to Brassica. *Frontiers in Plant Science*, 5, 27.

Kamh M, Horst W J, Amewr F, Mostafa H, Maier P. (1999)
Mobilization of soil and fertilizer phosphate by cover crops
Plant and Soil 211, 19

Kätterer, T., Hansson, A. C., & Andrén, O. (1993).
Wheat root biomass and nitrogen dynamics—effects of daily irrigation and fertilization. *Plant and Soil*, 151(1), 21-30.

Köpke U. (1999)
Review of Crop Production and weed Control: State of Arts and Outlook
in ENOF White book J. Isart & J.J. Llerena Eds, 27-77

Leclerc, B. (2001)
Guide des Matières Organiques. Tome 2, 90 p Eds ITAB

Leclerc, B. (2014)
Document de mise à jour du Guide des Matières Organiques. 1–32.

Li, X., Sørensen, P., Olesen, J. E., & Petersen, S. O. (2016).
Evidence for denitrification as main source of N₂O emission from residue-amended soil.
Soil Biology and Biochemistry, 92, 153–160

Li X., Petersen S.O., Sørensen P., and Olesen J.E. (2015)
Effects of contrasting catch crops on nitrogen availability and nitrous oxide emissions in an organic cropping system
Agriculture, Ecosystems and Environment 199 (2015) 382–393

Liu J., Macrae M., Elliott J., Baulch H., Wilson H., and Kleinman P. (2019)
Impacts of Cover Crops and Crop Residues on Phosphorus Losses in Cold Climates: A Review
Journal of Environmental Quality 48:850–868

Luxen P., Godden B. et Rabier F. (2012)
Le compostage des fumiers, une technique de valorisation des matières organiques en agriculture. Les Livrets de l'agriculture n° 20 SPW 45 p

- Nesme T, Toublant M, Mollier A, Morel C, Pellerin S (2012)
Assessing phosphorus management among organic farming systems: a farm input, output and budget analysis in southwestern France.
Nutr Cycl Agroecosystems 92:225–236.
- Nowak B., Nesme T., David C. and Pellerin S. (2013a)
To what extent does organic farming rely on nutrient inflows from conventional farming?
Environ. Res. Lett. 8, 044 - 045 (8pp)
- Nowak B., Nesme T., David C. and Pellerin S. (2013b).
Quelle est l'importance des transferts d'éléments minéraux de l'agriculture conventionnelle vers l'agriculture biologique?. *Innovations Agronomiques*, 32, pp.175-183.
- Ohm M., Paulsen H.M., Moos J.H., Eichler-Löbermann B. (2017)
Long-term negative phosphorus budgets in organic crop rotations deplete plant-available phosphorus from soil.
Agron Sustain Dev 37:17
- Padel S & Nick Lampkin N. 2010
Introduction to the concept and principles of organic farming. in *Organic food and farming A system approach to meet the sustainability challenge*; p 6-11
IFOAM EU Group
- Reimer, M., Möller, K. & Hartmann, T.E. (2020)
Meta-analysis of nutrient budgets in organic farms across Europe.
Org. Agr. 10, 65–77
- Richardson A.E., Simpson R.J. (2011)
Soil microorganisms mediating phosphorus availability.
Plant Physiol 156:989–996
- Rusch HP (1986)
La fécondité du sol : pour une conception biologique de l'agriculture
Bodenfruchtbarkeit: Eine Studie biologischen Denkens
Eds Courier du Livre 311 p
- Salomez J, J Pannier J., De Neve S., Georges Hofman, P Demyttenaere, Verstegen P., Vanparys L. et Sarrazyn R (1995)
Les résidus de récolte des cultures maraîchères dans
M. Geypens & J.P. Honnay (eds.) *Matières organiques dans le sol : conséquences agronomiques et environnementales*, Brussel, IWONL. p.105-128
- Schnürer J. and Rosswall T. (1982) Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. *Applied and Environmental Microbiology* 43, 1256-1261. Schnürer J. PhD 1982
- Sinaj, S. (2009).
Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages (DBF- GCH).
Revue Suisse d'Agriculture 41(1):1-98
https://www.researchgate.net/publication/286633945_Donnees_de_base_pour_la_fumure_des_grandes_cultures_et_des_herbages_DBF-GCH
- Stockdale, E. A., & Watson, C. A. (2009). Biological indicators of soil quality in organic farming systems. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 24(4), 308–318. <https://doi.org/10.1017/S1742170509990172>
- Stockdale, E. A., Shepherd, M. A., Fortune, S., & Cuttle, S. P. (2002). Soil fertility in organic farming systems - fundamentally different? *Soil Use and Management*, 18, 301–308. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00272.x>
- Teboh, J. M., & Franzen, D. W. (2011)
Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) potential to contribute solubilized soil phosphorus to subsequent crops. *Communications in soil science and plant analysis*, 42(13), 1544-1550.
- Thomsen, I. K. (2001).
Recovery of nitrogen from composted and anaerobically stored manure labelled with ¹⁵N.
Eur J Agronomy, 15, 31–41.


Tosti G., Benincasa P., Farneselli M., Tei F., and Guiducci M. (2014)
Barley hairy vetch mixture as cover crop for green manuring
Europ. J. Agronomy 54 (2014) 34– 39

Trinsoutrot, I., Recous, S., Bentz, B., Linères, M., Chèneby, D., & Nicolardot, B. (2000).
Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 918-926.

Walker R. L., Watson C.A. Rees R.M. and Stockdale E. A. (2006)
Improving supply and phosphorus use efficiency in organic farming systems.
Aspects of Applied Biology 79, 2006

Watson, C., Stopes, C. & Philipps, L. (1997).
Nitrogen cycling in organically managed crop rotations: importance of crop rotation design.
In *Ressources use in organic farming, third ENOF Workshop*. Eds Isart, I. & Llerana, J. J.

Watson, C. A., Rayns, F. W., Atkinson, D., Jackson, L. R., & Gosling, P. (2010).
Managing soil fertility in organic farming systems.
Soil Use and Management, 18, 239–247.



Ce document reprend de nombreuses parties et complète le Socle de connaissances
"Gestion de la fertilité des sols et des matières organiques en agriculture biologiques"

Bernard GODDEN, Avril 2021, 207 p CRA-W
Comité de relecture J.P. Destain, B. Huyghebaert et D. Stilmant

AUTEUR.E.S :

Bernard Godden et Beverley Minnekeer

REMERCIEMENTS :

Relecteur.e.s : Beverley Minnekeer, Max Morelle, Maëlle De Halleux (CRA-W CtRAb), Jean-Pierre Goffart (CRA-W), Patrick Sylvestre (Biowallonie) et Julie Legrand (CPL Vegemar)

Mise en page : Geneviève Minne (CRA-W)