

INFOSCTIFL

LE MENSUEL DU CENTRE TECHNIQUE INTERPROFESSIONNEL DES FRUITS ET LÉGUMES



FERTILISATION AZOTÉE DES CULTURES LÉGUMIÈRES : SPÉCIFICITÉ DES CULTURES, DES MÉTHODES ET ÉTAT DES PRATIQUES EN FRANCE



AUTEURS

François Lecompte, unité PSH, INRAE,
F-84914 Avignon, France
Antoine Gautier, CTIFL
Charlotte Berthelot, CTIFL
Claire Goillon, APREL
Olivier Favaron, UNILET
Anne Sophie Kouassi, Unilet
Jacques Le Bot, INRAE-PSH
Denis Le Hir, Chambre d'Agriculture
de Bretagne
Céline Mathieu, SERAIL
Virginie Parnaudeau, INRAE
Stéphane Plas, INVENIO
Sandra Prisca Pierre, CTIFL
Marie Uguen, Chambre d'Agriculture
de Bretagne
Hélène Védie, GRAB

SOMMAIRE

2	Avant-propos
4	Évaluation des besoins en azote des cultures légumières
7	Bilan d'azote dans les parcelles légumières
13	Pratiques de fertilisation en cultures légumières
20	Modélisation des flux d'azote dans les parcelles et outils d'aide à la décision
23	Perspectives
25	Bibliographie

AVANT-PROPOS



> CULTURE DE LAITUE SOUS ABRIS

Historiquement, le maraîchage s'établit en périphérie des villes à partir du XVIII^e siècle, permettant l'approvisionnement en produits frais des populations urbaines en croissance. Il se développe sur les zones marécageuses, assurant la disponibilité en

eau nécessaire aux cultures pendant les périodes estivales. L'entretien de la fertilité des sols est, quant à lui, assuré par le recyclage des différentes sources d'amendement organiques ou minérales locales, comme les fumiers, la chaux, etc.

Comme les autres cultures, les productions légumières bénéficient dès le ^{xix}^e siècle des progrès de la révolution industrielle. Avec la mécanisation, de nouveaux outils agricoles voient le jour et contribuent à l'évolution des techniques de culture, même si le recours aux interventions manuelles reste la norme. Les moyens de transport deviennent plus efficaces et moins coûteux et l'approvisionnement en produits frais devient plus facile. Les productions légumières prennent alors la clé des champs et investissent de nouveaux espaces ruraux loin des villes.

Ce tournant, amorcé au ^{xix}^e siècle, est amplifié au début du ^{xx}^e siècle par la production en masse d'engrais azotés de synthèse par le procédé Haber-Bosch ; jusqu'à cette période, la fertilisation reposait essentiellement sur des amendements organiques apportés de manière empirique. Cette intensification industrielle du processus naturel de fixation biologique du diazote atmosphérique ouvre la voie à l'intensification des cultures légumières et contribue au formidable essor démographique qu'accompagne l'agriculture.

Or le rendement d'utilisation de l'azote par les cultures reste faible et à peine la moitié de l'azote se retrouve dans les parties récoltées. Le solde se retrouve dans le sol ou se disperse dans l'environnement, constituant non seulement une perte économique substantielle pour les agriculteurs mais aussi des dommages pour l'environnement, le climat et la santé humaine. Il est donc impératif d'adapter les pratiques de fertilisation et d'apporter l'azote au bon endroit, au bon moment, à la bonne dose et sous la bonne forme, pour toutes les productions végétales.

C'est pour accompagner les agriculteurs qui cherchent à faire évoluer leurs pratiques que le Réseau Mixte Technologique « BOUCLAGE :



> CONFECTION D'UN ANDAIN DE COMPOST

Recyclage, Fertilisation et Impacts Environnementaux » fédère de nombreux organismes autour de ces enjeux de gestion de la fertilisation des cultures et des cycles biogéochimiques. Il se réjouit d'accueillir des organisations professionnelles spécialisées en arboriculture, viticulture et cultures maraîchères. Il se félicite que les travaux de recherche, l'acquisition de références, la mise au point de méthodes et d'outils concernant dorénavant de manière plus affirmée les productions légumières. Il encourage les partenariats entre l'ensemble des organismes couvrant une large gamme des échelles TRL de la R&D pour dyna-

miser le cycle des innovations en ce qui concerne les pratiques de fertilisation de ces cultures si spécifiques.

Au-delà de la réponse qu'elle apporte aux obligations réglementaires, cette gestion éclairée de la ressource azotée en cultures légumières nécessite une bonne connaissance des besoins en azote de ces cultures, des différents devenir de l'azote au champ conditionnant sa disponibilité, mais aussi une adaptation des pratiques en fonction des objectifs de production et une maîtrise des outils conçus pour apporter des aides à la décision. Ce hors-série fait le point sur l'état des connaissances sur ces différents points. ■

ÉVALUATION DES BESOINS EN AZOTE DES CULTURES LÉGUMIÈRES

DIVERSITÉ DES CULTURES LÉGUMIÈRES

Un légume est défini comme la partie consommée d'une plante potagère, traditionnellement cultivée sur une surface spécifique par un maraîcher. Dans l'agriculture française, les cultures légumières regroupent une quarantaine d'espèces et des modes de production très variés, allant du potager associant de multiples espèces produites concomitamment sur une même parcelle à des productions introduites dans des rotations de grandes cultures. La notion de diversité légumière s'illustre de multiples manières sur des critères botaniques et techniques. Selon les espèces, le légume représente différents organes récoltés : on distingue les légumes-feuilles, fruits, racines ou tiges. Les espèces peuvent être de type annuel, bisannuel ou pérenne. Les calendriers de production et de récolte, y compris au sein d'une même espèce, sont très variables, de même que les aménagements introduits dans les parcelles (couverture du sol par des paillages, installation d'abris simples ou sophistiqués, irrigation suivant diverses méthodes etc.). À titre d'exemple, on distingue trois créneaux de production de carotte dans le sud-ouest de la France : un créneau primeur où le semis a lieu en automne ou en hiver et où la carotte est bâchée après semis, un créneau de saison avec un semis d'avril à juin et un créneau de conservation, où après

un semis d'été la carotte est conservée dans le sol en hiver. De la même manière, on observe de très nombreuses différences de modes de production entre une tomate de plein champ destinée à la transformation, une tomate de saison destinée au marché de frais produite en sol sous abri froid et une tomate de contre-saison produite en substrat hors-sol sous serre chauffée.

Le niveau de mécanisation et d'interventions manuelles sur les plantes, depuis l'implantation de la culture à la récolte, est également très variable selon les cultures. Les espèces palissées cultivées sous abri réclament beaucoup d'interventions manuelles, tandis que des productions en plein champ sont entièrement mécanisées. La nature de ces interventions et les déplacements humains dans les parcelles influencent la disposition spatiale des cultures, implantées en rangs ou non, induisant des densités très différentes d'une production à l'autre. Cette diversité implique que les biomasses accumulées, les quantités et l'hétérogénéité des nutriments nécessaires pour produire ces biomasses ainsi que l'origine et le mode d'apport de ces nutriments sont extrêmement variés. Ce dossier présente une vision générale de la gestion de l'azote dans les agroécosystèmes légumiers et montre ce qui relève de principes agromomiques communs à toutes les plantes cultivées et ce qui relève davantage de la spécificité des cultures légumières.

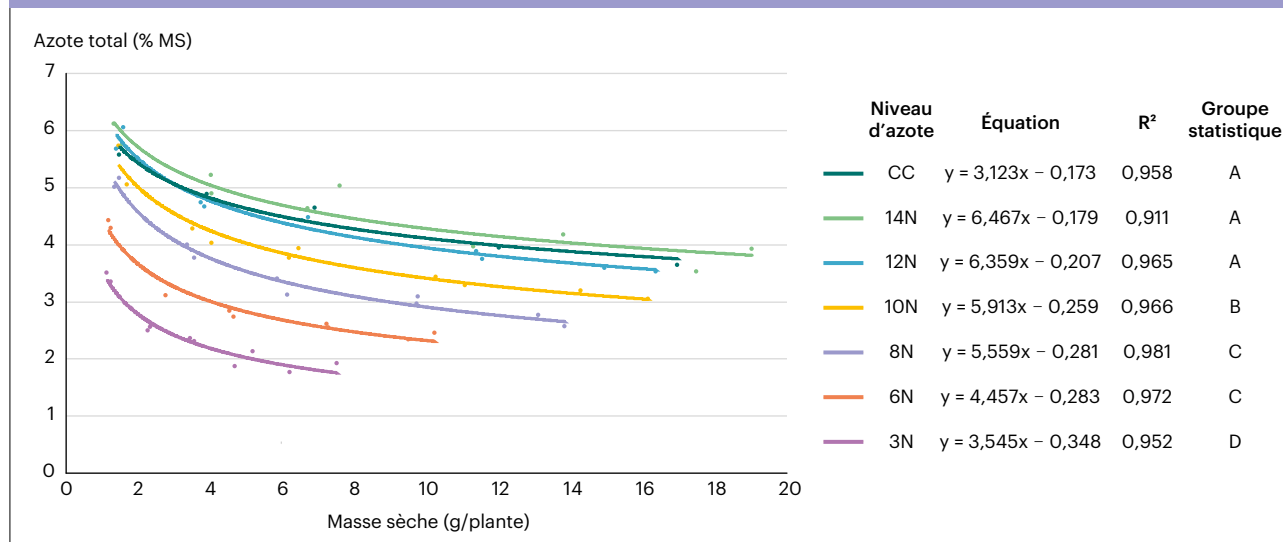
BASES PHYSIOLOGIQUES DE L'ACCUMULATION D'AZOTE DANS LES PLANTES

Il n'existe pas de différence notable entre les espèces légumières et les autres végétaux sur le plan de leur richesse en azote ou en carbone. Leur matière sèche contient entre 2 et 5 % d'azote pour environ 40 % de carbone. L'azote (N) est surtout présent dans les plantes sous forme organique, mais une fraction se trouve sous forme minérale, essentiellement sous forme d'ion nitrate NO_3^- dissout dans l'eau, en grande partie dans les vacuoles. La plante peut également contenir l'ion ammonium NH_4^+ et de façon marginale l'ion nitrite NO_2^- qui est toxique pour la plupart des végétaux. Les formes organiques sont majoritairement des protéines, des peptides, des acides aminés libres et des acides nucléiques. L'azote est un élément constitutif de nombreux composés comme les bases puriques et pyrimidiques, les uréides, les noyaux pyrroles, les chlorophylles, les vitamines B, la phénylalanine et ses dérivés, de nombreux composés aromatiques (alcaloïdes) et des hormones (auxines, cytokinines). Les processus d'acquisition de l'azote depuis la rhizosphère et d'assimilation sous forme d'azote organique ont été très étudiés (Xu *et al.*, 2012, [45, 109]). Il fait aujourd'hui consensus que la croissance d'une plante est liée à son statut azoté endogène, communément estimé d'après



> LES SYSTÈMES DE CULTURES LÉGUMIERS SONT TRÈS VARIÉS : PLEIN CHAMP OU SOUS ABRIS, EN RANG OU EN PLANCHE, ANNUEL OU PÉRENNE

FIGURE 1 : Courbe de dilution et niveaux de fertilisation



Des courbes de dilution sont calculées à partir de laitues cultivées sous différents régimes azotés. Statistiquement, les courbes de dilution des niveaux de fertilisation azotée 12N et 14N sont équivalentes et reflètent une croissance optimale. Une courbe de dilution critique (CC) est calculée sur la moyenne de ces deux conditions de fertilisation. Les teneurs critiques en azote [Nc] de cette courbe permettent de calculer l'indice de nutrition azotée (INN) au cours de la culture.

la mesure d'une concentration totale ou tissulaire. Le processus d'absorption racinaire de l'azote alimente d'abord un compartiment ou pool de réserves qui est ensuite utilisé pour fabriquer les structures, composées de molécules plus ou moins complexes et contenant de l'azote. Les réserves azotées sont particulièrement importantes pour la plante car elles constituent un stock lui permettant de découpler la croissance et la fabrication des structures du processus d'absorption racinaire. Chez les espèces annuelles, ces réserves sont surtout constituées par l'azote nitrique et les acides aminés libres. Le NO_3^- est la forme principale de transport d'azote dans le xylème, ce qui permet sa distribution à la fois dans les racines et les organes aériens. Le stockage du nitrate est tributaire de celui de l'eau ce qui explique que différents organes expriment des capacités contrastées pour son accumulation [19]. Ainsi, chez la tomate au stade végétatif, les tiges peuvent contenir 50 % de l'eau de la plante et 70 % du nitrate du végétal [47]. Les plantes accumulatrices de NO_3^- ont en général de plus faibles teneurs en matière sèche.

De nombreuses études de réponse de la croissance (accumulation de masse sèche, MS) à la dose en azote ont été menées. Elles montrent toujours une réponse hyperbolique de masse sèche à la concentration en azote [N] dans la masse sèche MS (Figure 1). De cette relation, a été tirée, dès les années 1950, la notion de teneur critique en azote [Nc]. La teneur critique en azote est la concentration mi-

nimale permettant de produire la masse sèche maximale c'est-à-dire la limite au-delà de laquelle une augmentation de la concentration en azote ne permet pas d'obtenir une croissance supplémentaire. Les travaux de Burns [16] ou de Justes *et al.* [44] ont proposé un cadre méthodologique de référence pour la mesure de la teneur critique en azote [Nc]. Dans ce contexte, on considère que l'azote accumulé au-delà de la teneur critique en azote [Nc] est un bon estimateur de l'azote de réserve. De nombreux travaux ont démontré l'évolution de la teneur critique en azote [Nc] au cours du développement du végétal modélisé par une « allométrie » d'équation : $[N_c] = a \text{ MS}^b$ dans laquelle les paramètres « a » et « b » ont été très étudiés, en particulier dans les phases végétatives. Une des conclusions les plus utiles de ces travaux a sans doute été d'établir que les plantes de type photosynthétique C3 se différencient du type C4 mais qu'au sein d'un même type, la variabilité interspécies de la valeur de ces paramètres était faible. Les espèces légumières cultivées en France sont du type photosynthétique C3. La valeur de « a » reflète essentiellement la teneur critique en azote [Nc] des plantes jeunes tandis que la valeur de « b » varie davantage en fonction de la pénétration de la lumière dans le couvert, parfois influencée par les pratiques culturales. L'exploitation pratique de ces résultats a été formalisée en considérant que la fertilisation azotée n'est utile aux cultures que si $[N] < [N_c]$ (Lemaire *et al.*, 2008, [52]). Le

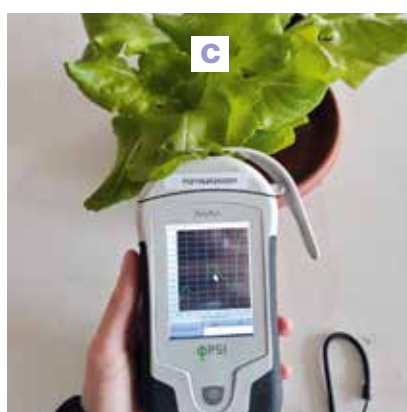
rapport $[N] / [N_c]$ a été défini comme l'indice de nutrition azotée INN de la culture. Lorsque l'indice de nutrition azotée est supérieur à 1 ($\text{INN} > 1$), l'état de suffisance prévaut. À l'inverse lorsque l'indice de nutrition azotée est inférieur à 1 ($\text{INN} < 1$), le sol ne fournit plus l'azote nécessaire pour assurer le potentiel de croissance de la culture et la disponibilité en azote devient le facteur limitant de la croissance. Dans cette situation, un surcroît d'azote doit être rendu disponible par exemple par l'apport d'engrais azoté, pour rétablir le rendement potentiel.

MESURE DE L'ÉTAT AZOTÉ DES COUVERTS

Afin de déterminer l'indice de nutrition azotée INN d'une culture, la teneur critique en azote [Nc] étant établie pour une espèce donnée à un stade donné de la culture, des méthodes de mesures au champ ont été élaborées pour mesurer la concentration en azote [N]. Certaines sont des méthodes chimiques rapides qui permettent d'établir une relation entre le NO_3^- dosé dans un organe (pétiole par exemple) et la valeur de l'INN de la plante. D'autres utilisent les propriétés optiques des feuilles pour estimer indirectement la concentration en azote dans la culture. Chez les espèces légumières, les méthodes PILazo® [31, 79] ont été construites sur ces principes. Les auteurs ont tiré parti de la règle générale selon laquelle l'azote de réserve s'accumule

dans les organes lorsque l'indice de nutrition azotée INN dépasse 1. À partir d'un référentiel soigneusement établi en condition de cultures, des grilles opérationnelles d'interprétation des teneurs en NO_3^- des sèves ont été construites chez neuf espèces légumières¹.

L'accès à la concentration en nitrate dans la sève est parfois jugé laborieux par les praticiens : il convient de récupérer le jus pétioleaire sur plusieurs plantes, de le filtrer, de le diluer et de doser les nitrates, le plus souvent avec un réfractomètre de terrain. Les possibilités d'accéder plus rapidement et de manière non destructive, à la teneur en azote des organes via des mesures optiques ont été explorées. Une synthèse des différentes techniques disponibles et des essais réalisés en cultures légumières a été proposée récemment (Padilla *et al.*, 2018, [68]). Pour de nombreuses espèces légumières, en particulier les cultures maraîchères, on utilise des capteurs proximaux positionnés près du couvert végétal. Trois types de technologies ont été développés : la mesure relative de la chlorophylle par transmittance, la réflectance du couvert et la fluorescence de la chlorophylle ou d'autres composés, comme les flavonols, bien corrélés à la teneur en azote de la plante. Dans tous les cas, les capteurs n'évaluent pas directement la teneur en azote et les mesures doivent être interprétées à partir de calibrations pour estimer le statut azoté du couvert. Le plus souvent, de bonnes corrélations sont obtenues entre les signaux mesurés et les teneurs en azote des végétaux. Cependant la réponse peut dépendre de la phase de développement de l'espèce ou du génotype et d'autres effets biotiques ou abiotiques peuvent modifier les propriétés optiques des feuilles et l'interprétation des données. En fonction des technologies, la dépendance de la mesure aux conditions extérieures, en particulier le rayonnement, peut être importante. La surface concernée par une mesure et donc la représentativité de celle-ci, varie beaucoup d'une technologie et d'une offre commerciale à l'autre : les capteurs de réflectance mesurent en général une surface de couvert plus importante et peuvent être utilisés en mouvement ou montés sur des automates. La sensibilité de certaines technologies est parfois discutée, en particulier celle des



> OUTILS DE DIAGNOSTICS POUR ÉVALUER LA TENEUR EN AZOTE DES CULTURES : (A) DUALUX (FORCE-A), (B) MULTIPLEX (FORCE-A), (C) POLYPEN (PHOTON SYSTEMS INSTRUMENTS) ET (D) SPAD-502 (KONICA MINOLTA). CES APPAREILS PERMETTENT LA MESURE D'INDICATEURS PHYSIOLOGIQUES DE LA PLANTE POUVANT ÊTRE RELIÉS AU STATUT AZOTÉ DE LA PLANTE.

chlorophylle-mètres (mesure de la transmittance), pour lesquels la relation entre le signal mesuré et la teneur en chlorophylle peut atteindre un plateau aux fortes teneurs en azote [66]. Ainsi, il peut être difficile, dans certaines conditions, de distinguer les situations de suffisance en azote des situations d'excès d'azote. Les travaux menés par le CTIFL sur les mesures optiques ont conclu à une plus forte sensibilité des mesures de fluorescence par rapport aux autres technologies. Des mesures couplées de fluorescence de la chlorophylle et des flavonols, permettant de calculer un indice de balance azotée (NBI), apparaissent satisfaisantes pour décrire avec précision les teneurs en azote des plantes, dans une large gamme de variations de celles-ci.

Les technologies optiques sont considérées comme prometteuses et leur développement pratique sur le terrain en cultures légumières est attendu dans les prochaines années. Elles sont d'autant plus utiles que pour de nombreuses cultures légumières, la fertilisation est fractionnée en de nombreux apports, voire elle devient quasi continue en cultures fertirriguées (cas du goutte-à-goutte). Ainsi,

chaque apport de fertilisant azoté supplémentaire peut être raisonné en fonction des contrôles effectués. Cependant des travaux approfondis doivent encore être réalisés pour proposer des outils qui font le lien entre les mesures obtenues et les doses de fertilisants à apporter. Les mesures sur plantes seules sont directement opérationnelles quand elles indiquent un l'indice de nutrition azotée supérieur à 1 ($\text{INN} > 1$) (une teneur $[\text{N}] > [\text{Nc}]$), qui doit logiquement conduire à ne pas apporter d'azote minéral supplémentaire tant que la teneur n'est pas redescendue au niveau optimal. Mais dans les situations de suffisance ou d'insuffisance en azote, les outils d'estimation des besoins des plantes ne génèrent pas automatiquement des recommandations vertueuses concernant la dose d'engrais azoté à apporter. L'apport d'engrais azoté transite par le sol, hors pulvérisation foliaire, et doit tenir compte outre l'état de la plante des phénomènes qui déterminent la disponibilité en azote dans la rhizosphère. Les outils « plantes » ne préjugent pas de l'efficacité de l'engrais apporté : celle-ci peut être faible et générer d'importantes pertes d'azote dans l'environnement. ■

¹ À ce jour : tomate, aubergine, carotte, fraiser, melon, pomme de terre primeur, chou-fleur, poivron, poireau.

BILAN D'AZOTE DANS LES PARCELLES LÉGUMIÈRES

PRINCIPES DU BILAN AZOTÉ

La méthode du bilan est généralement fondée sur le principe général de conservation de la masse et le bilan azoté considère la masse d'azote minéral du sol. Cette méthode est basée sur les connaissances très approfondies du cycle biogéochimique de l'azote à l'échelle parcellaire (Figure 1). L'azote existe sous différentes formes organiques au sein de la biomasse vivante, décliné grossièrement en fractions des restitutions végétales fraîches ou rapidement décomposables et d'humus ; il est également présent sous différentes formes minérales, d'ions en solution (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+) ou sous forme gazeuse dans le sol et l'atmosphère (N_2 , NO , N_2O , NH_3). Le bilan de masse du stock d'azote minéral est défini par la différence entre la quantité d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan (R_f) et la quantité d'azote minérale dans le sol à l'ouverture du bilan (R_i) (Pour plus d'informations, se référer à l'encadré « L'équation du bilan azoté et sa simplification » Tableau 1) : Bilan de masse du stock d'azote minéral (kg/ha) = $R_f - R_i$ = Entrées d'azote – Sorties d'azote.

Puisque les cinétiques d'absorption d'azote par les plantes sont liées à l'accroissement de biomasse, il en résulte que l'estimation des besoins est basée sur les rendements escomptés. Les besoins prévisionnels (mobilisations) de référence ont été obtenus par espèce pour les plantes légumières, à partir des biomasses produites et des teneurs en azote mesurées dans les organes récoltés. Un document du COMIFER donne des valeurs de mobilisation d'azote recueillies par les instituts techniques et scientifiques français sur les cultures légumières (voir tableau). Ces documents précisent rarement les conditions d'obtention des données ni si celles-ci ont été obtenues sur des cultures cultivées aux seuils critiques d'azote ou à des niveaux d'azote supérieurs. Les mesures ou estimations au-delà des seuils critiques peuvent surestimer les exportations des plantes et donc les besoins. Selon les cas ces besoins peuvent être exprimés

L'ÉQUATION DU BILAN AZOTÉ ET SA SIMPLIFICATION

L'équation complète du bilan considère que la variation dans le temps du stock d'azote minéral par unité de volume de sol est égale à la différence entre ses entrées et ses sorties d'azote pendant la période considérée. La formulation retenue par le COMIFER (https://comifer.asso.fr/images/publications/brochures/BROCHURE_AZOTE_20130705web.pdf) est la suivante :

$$R_f - R_i = [Mh + Fs + Fns + Mhp + Mr + MrCi + Mpro1 + Mpro2 + A + Nirr + X + Xpro] - [Pf - Pi + Ix + Gs + Gx + L]$$

TABLEAU 1 : PARAMÈTRES DE L'ÉQUATION DU BILAN AZOTÉ

États initial et final	R_f	Quantité d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan
	R_i	Quantité d'azote minéral dans le sol à l'ouverture du bilan
Entrées d'azote dans le système	Mh	Minéralisation de l'humus du sol
	Fs	Fixation symbiotique d'azote atmosphérique
	Fns	Fixation non symbiotique d'azote atmosphérique
	Mhp	Minéralisation due à un retournement de prairie
	Mr	Minéralisation de résidus de récolte
	$MrCi$	Minéralisation de résidus de culture intermédiaire
	$Mpro1$	Minéralisation de PROs*, apportés avant l'ouverture du bilan
	$Mpro2$	Minéralisation de PROs*, apportés après l'ouverture du bilan
	A	Apports atmosphérique
	$Nirr$	Azote apporté par l'eau d'irrigation
	X	Azote apporté sous forme d'engrais minéral de synthèse
	$Xpro$	Azote minéral apporté par un PRO*
Sorties d'azote dans le système	Pf	Quantité d'azote absorbé par la culture à la fermeture du bilan
	Pi	Quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan
	Ix	Organisation microbienne de l'engrais
	Gs	Pertes d'azote du sol par voie gazeuse
	Gx	Pertes d'azote par voie gazeuse aux dépens de l'engrais ou de PROs*
	L	Pertes d'azote par lixiviation du nitrate

*Produit résiduel organique

Dans la majorité des situations de production légumière sans plante fixatrice d'azote atmosphérique, certains termes d'entrée et de sortie d'azote sont inexistantes ou négligeables : c'est le cas pour Fs (fixation d'azote atmosphérique), Mhp (minéralisation liée au retournement d'une prairie), A (apports atmosphériques) et Ix (organisation de l'engrais). De plus, la fixation non symbiotique, qui est réalisée par des bactéries spécifiques, représente en général quelques kilogrammes d'azote par an ; elle est parfois négligée à l'usage, ou on considère que certains types de pertes gazeuses la compensent. Le bilan ainsi simplifié indique que la variation de stock d'azote minéral du sol est égale à la somme de la minéralisation nette et des apports d'azote minéral (par les engrais et/ou l'eau) moins la somme des prélèvements d'azote minéral par la culture et les pertes, par lixiviation ou sous forme gazeuse :

$$R_f - R_i = [Mh + Fns + Mr + MrCi + Mpro1 + Mpro2 + Nirr + X + Xpro] - [Pf - Pi + Gs + Gx + L]$$

pour un rendement cible, ou pour des plages de rendements, auquel cas les besoins fluctuent également entre une valeur basse et une valeur haute. L'évaluation du rendement objectif qui permet d'estimer les besoins en azote de la culture peut poser un problème du fait de la variabilité interparcellaire observée et de la variabilité interannuelle, comme cela a été montré en grande culture [78]. Une certaine aversion au risque de perdre en production ou en qualité peut conduire les agriculteurs à considérer que le rendement objectif correspond au rendement potentiel (observé dans la meilleure situation). Une surestimation du rendement objectif aboutit à des estimations des besoins trop élevés et peut conduire en conséquence à une surfertilisation [78].

ADÉQUATION ET LIMITES DU BILAN AZOTÉ POUR LES CULTURES LÉGUMIÈRES

La méthode du bilan suppose un compartiment homogène (en général de profondeur 30 à 50 cm selon les cultures) dans lequel les flux de sortie sont implicitement considérés comme monodimensionnels. Or, dans les cultures avec de larges inter-rangs (par exemple l'asperge, les solanacées et les cucurbitacées en général, les cultures en planches...) et/ou dans les cultures avec un point source d'injection d'eau ou d'azote minéral dans le sol (irrigation localisée et/ou fertirrigation, fréquents en cultures légumières), tous les processus qui gouvernent le cycle de l'azote varient suivant au moins deux dimensions dans l'espace (Bar Yosef, 1999, [38, 48, 49]). Dans ces circonstances, l'hypothèse d'homogénéité du compartiment dans lequel est calculé le bilan ne peut être retenue, car de forts gradients horizontaux de concentration en azote minéral sont observés. Ces gradients résultent en particulier de la localisation de l'apport d'eau et d'engrais et d'une activité microbienne et de prélèvements d'eau et de minéraux par les racines qui diffèrent entre le rang et l'inter-rang. Les transports d'azote minéral sont pour partie de la lixiviation au sens strict, c'est-à-dire un déplacement vertical avec l'eau jusqu'à une profondeur où ils ne pourront plus être captés par

les racines, mais également des déplacements latéraux sous l'inter-rang. Dans ce cas l'azote peut être récupéré ultérieurement par des cultures implantées dans ces zones. Ce constat implique de mener la réflexion du bilan d'azote à l'échelle intraparcélaire, ce qui n'est pas fait en pratique (Lecompte, 2012, [48]). Dans les cultures plus homogènes et irriguées par aspersion où la variabilité horizontale des paramètres affectant la transformation de l'azote et les flux de solutés ne sont pas très importants (cas des choux, du chou-fleur, de la carotte, du haricot, du céleri...), les formalismes de la méthode du bilan sont plus facilement transposables sans considération d'une seconde dimension horizontale.

MINÉRALISATION DE L'HUMUS ET DES PRODUITS RÉSIDUAIRES ORGANIQUES

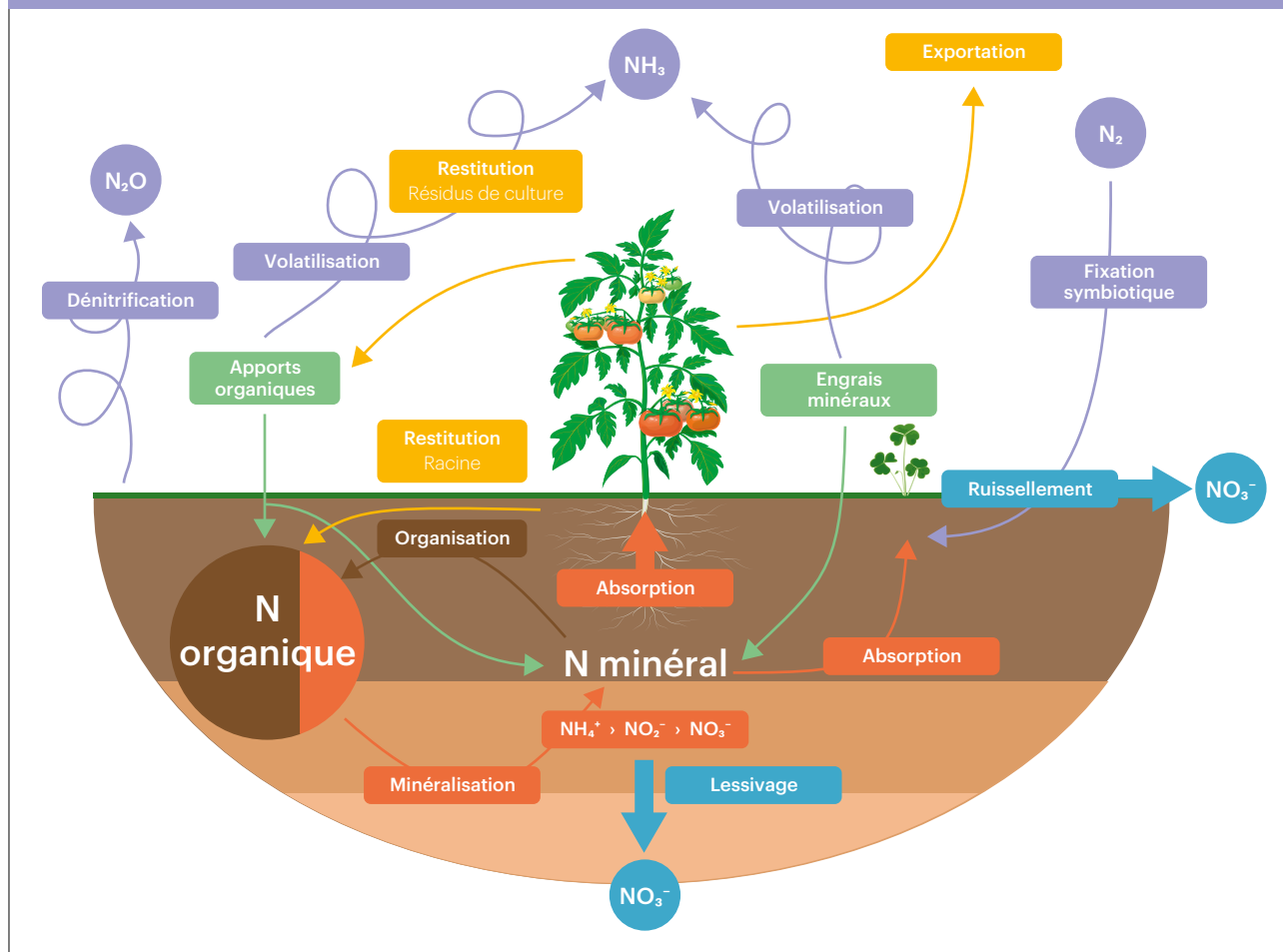
D'un point de vue agronomique, l'apport d'amendements ou de fertilisants organiques contribue à améliorer le taux de matière organique des sols avec des effets bénéfiques bien documentés : maintien d'une bonne structure, protection contre l'érosion, stockage de carbone, augmentation de la biodiversité, meilleure rétention en eau, amélioration de la fertilité [12, 15, 29, 35]. Par ailleurs, l'utilisation de déchets organiques (comme les composts de déchets verts) ou de produits résiduels organiques (PRO), permet de les valoriser en les recyclant via les sols agricoles. En agriculture biologique (AB), la fertilisation organique s'intègre et se raisonne à l'échelle de la succession culturale et/ou de l'association de cultures, avec une place de choix pour les engrais verts qui permettent d'approvisionner le système sol-plantes en carbone et en azote. Les facteurs influençant la minéralisation de la matière organique du sol ont été très étudiés. À l'échelle des écosystèmes, la respiration du sol dépend fortement des restitutions organiques des couverts végétaux par les litières et les racines (Ryan and Law,



> EFFET DE LA TENEUR EN FERTILISANT AZOTÉ SUR LA CROISSANCE DE LA TOMATE

2005, [84]). Les principes d'estimation et de modélisation de la minéralisation sont similaires pour les différents types de production agricole, y compris légumiers. Dans la méthode du bilan préconisée par le COMIFER, la minéralisation de l'azote contenu dans l'humus est calculée à partir du produit de la teneur en azote organique du sol, d'un taux de minéralisation (paramètre appelé K_m) et du nombre de jours normalisés calculés pendant la période où est réalisé le bilan. Les jours normalisés sont une échelle de temps modifiée pour tenir compte des conditions de température et d'humidité du sol de la parcelle étudiée, les taux de minéralisation standard étant obtenus en laboratoire dans des conditions stables de température et d'humidité, ce qui n'est pas le cas au champ. Le taux de minéralisation K_m est estimé à partir d'une formule utilisant une valeur standard $K_{m\text{standard}}$ de la teneur en argile et de calcaire du sol et d'un facteur de correction F_{syst} , compris entre 0,8 et 1,2 et défini comme « facteur d'augmentation du pool d'azote organique rapidement minéralisable sous l'effet du régime de restitution organique du système de culture ». Des techniques de modélisation peuvent également être utilisées pour estimer la minéralisation (Vereecken et al., 2016, [57, 107]). Dans les modèles les plus simples, la minéralisation du carbone est calculée en considérant un ou plusieurs compartiments organiques présentant des cinétiques

FIGURE 1 : Cycle de l'azote en culture légumière (adapté aux cultures légumières d'après programme-nitrate.gouv.fr)



L'azote entre dans le système de culture à travers (1) les apports organiques, qu'ils soient de nature extérieure ou provenant des résidus de culture, (2) l'utilisation d'engrais minéraux azotés sous différentes formes (solide ou liquide, de nature uréique, ammoniacale ou nitrrique) et (3) par la fixation symbiotique réalisée par les légumineuses. L'azote organique n'est pas directement assimilé par les plantes, l'activité des bactéries du sol va permettre sa minéralisation sous forme minérale. Les pertes en azote depuis le système se font à travers (1) le lessivage et le ruissellement des nitrates, (2) la volatilisation de l'ammoniac, (3) les processus de dénitrification qui transforment les nitrates en protoxyde d'azote qui rejoignent l'atmosphère et (4) l'exportation liée aux activités agricoles.

de décomposition d'ordre 1 ou supérieur, avec des taux de décomposition spécifiques à chaque compartiment. Concernant la matière organique fraîche (résidus de cultures), les cinétiques de décomposition peuvent tenir compte du rapport carbone/azote (C/N) de cette matière organique [64]. Il est établi que la minéralisation nette d'un résidu à rapport carbone/azote élevé peut être négative pendant plusieurs mois du fait de l'activité microbienne et que la quantité finale d'azote minéralisé est bien corrélée à la quantité d'azote organique enfoui [102].

Une grande diversité de produits résiduels organiques PRO est utilisée en cultures légumières, qu'il s'agisse d'amendements organiques (NFU 44-

051, NFU 44-095, fertilisants de type I) ou d'engrais organiques (NFU 42-001, fertilisants de type II). Les produits de type engrais libèrent rapidement leur azote puis la minéralisation évolue relativement lentement. Les amendements organiques sont susceptibles de générer une organisation temporaire (prélèvement d'azote minéral dans le sol par les microbes, appelée aussi « faim d'azote ») avec des valeurs fertilisantes à court terme plus faibles que les produits de type II. Les références sur la minéralisation des PRO sont établies à partir de tests d'incubation en conditions contrôlées et de tests au champ. La base de données Azopro (<http://www.ctifl.fr/azopro/>) référence 62 produits organiques qui ont fait l'objet d'étude

de composition et de cinétique de minéralisation. Pour les cultures légumières, cette base de données complète les références nationales donnant les valeurs de teneurs en azote total et ammoniacal de la plupart des PRO utilisables (<https://comifer.asso.fr/fr/bilan-azote.html>). La combinaison de ces deux bases de données permet d'orienter le choix des intrants organiques dans les plans de fumure des rotations légumières.

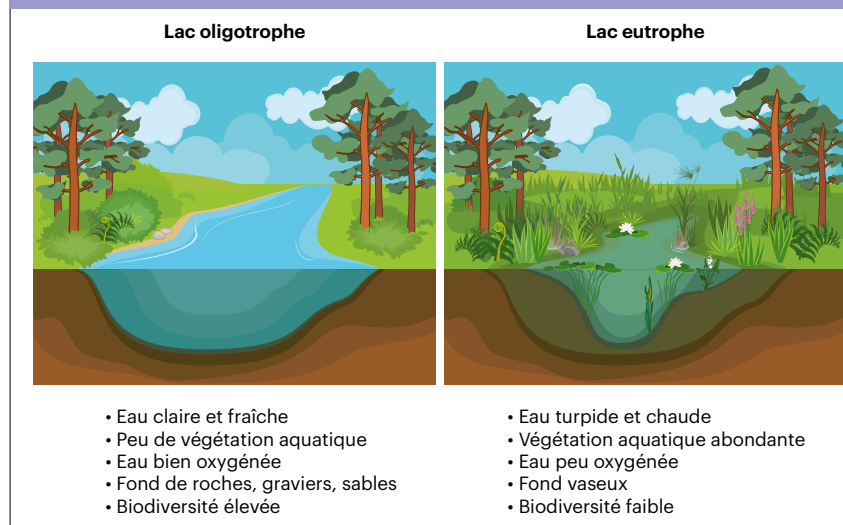
La restitution sous forme d'azote minéral de l'azote organique apporté par les PRO ou les couverts végétaux peut en conséquence être très différente, selon le type d'apport, le sol et les conditions environnementales. Après environ 90 jours normalisés, des taux de minéralisation de l'azote organique supérieurs

à 50 % sont couramment observés pour certains produits. Concernant les résidus de cultures, des taux nets de minéralisation de 20 à 80 % après 15 semaines d'incubation peuvent être observés en conditions optimales [25] et des taux de 20 à 45 % peuvent être observés au champ après 130 jours pour des résidus d'engrais verts enfouis, y compris en région froide [13]. Dans des conditions d'apports d'azote organique très importants, par exemple après enfouissement de plusieurs dizaines de tonnes par hectare de composts ou de résidus d'élevage, la minéralisation dans les mois qui suivent l'apport peut largement excéder les quantités prélevées par les cultures légumières, augmenter l'électroconductivité du sol et favoriser la lixiviation [61, 74].

Des méthodes d'expérimentation ou de modélisation permettent d'estimer des cinétiques globales de minéralisation pour l'ensemble des compartiments organiques (humus, matière organique fraîche, biomasse microbienne etc.) afin de comparer ces valeurs aux besoins des cultures légumières. Un certain nombre de travaux ont été réalisés en France sur des cultures de laitue sous abri, dans des situations où l'azote est essentiellement apporté sous forme minérale. Les résultats expérimentaux [11, 48] concordent avec les simulations de modèles [24, 51] suggérant une minéralisation totale nette entre 0,3 et 1 kg N.ha⁻¹.j⁻¹. Pour un besoin d'environ 100 kg N.ha⁻¹ d'une culture produisant une biomasse fraîche récoltée de 60 t.ha⁻¹ en 90 jours, la minéralisation représente ainsi entre 27 % et 90 % des exportations. Dans des sols où le stock d'azote organique et les restitutions des couverts intermédiaires sont plus importants, la minéralisation nette d'azote pendant le cycle de la laitue peut dépasser de 2 à 3 fois les besoins de la culture [50]. En Allemagne, il a été proposé à partir d'un grand nombre d'expérimentations sur cultures légumières un taux apparent de minéralisation (qui tient compte des pertes d'azote minéral dans l'environnement) de 0,79 kg N.ha⁻¹.j⁻¹ [34]. En Bretagne, un taux similaire de 0,76 kg N.ha⁻¹.j⁻¹ est utilisé.

Tous les sols, qu'ils soient légumiers ou autre, présentent une répartition hétérogène de la matière organique et de l'activité de la biomasse microbienne. Ces variations spatiales s'observent à

FIGURE 2 : Schéma du phénomène d'eutrophisation lié à la pollution azotée sur les cours d'eau



toutes les échelles de volumes [107] et sont susceptibles de biaiser les bilans si les estimations de minéralisation ne correspondent pas à l'échelle représentée par le bilan. Comme indiqué ci-dessus, les cultures en rang et/ou en irrigation localisée montrent de fortes différences dans la dimension horizontale. Les écarts intra-parcellaires de la minéralisation méritent d'être davantage étudiés en cultures légumières, afin d'améliorer la précision des bilans.

PERTES PAR LIXIVIATION

Les systèmes légumiers sont, partout dans le monde, caractérisés par les très grandes quantités d'azote apportées aux cultures pour assurer les exportations de biomasse. Il est bien établi que les pertes d'azote par lixiviation sont dépendantes de la concentration en azote nitrique du sol et de la quantité d'eau apportée ainsi que de la conductivité hydraulique du sol, ces deux derniers facteurs déterminant la quantité d'eau drainée sous la zone d'extraction racinaire [10, 27]. Les systèmes légumiers sont considérés comme ceux où les pertes par lixiviation sont les plus importantes, du fait des grandes quantités apportées d'engrais azotés, du maintien par l'irrigation d'un potentiel hydrique très élevé du sol de surface favorisant les flux drainants et d'un enracinement relativement superficiel chez beaucoup d'espèces, a fortiori en conditions irri-

guées [67]. Les références disponibles dans la littérature scientifique des deux dernières décennies, corroborées par de nombreuses expériences pratiques de terrain, font état de pertes très variables d'azote nitrique par lixiviation et avoisinant fréquemment plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de kilos de NO₃-N par hectare et par cycle de culture suivant les régions de production (voir par exemple [4] pour la carotte ; [76] pour l'artichaut, le chou-fleur et l'oignon ; [106] pour la tomate d'industrie ; [59] pour une rotation tomate-concombre-cèleri ; [115] pour la courgette, le poivron et la tomate ; [37] pour la tomate d'abri ; [41] pour le fraiser ; [48] pour la laitue etc.) (Figure 2).

Le fractionnement des apports d'azote, réalisable dans beaucoup de cultures légumières, devrait permettre d'ajuster au mieux la quantité d'azote minéral du sol aux besoins des plantes à différentes périodes de leur cycle. Mais un suivi insuffisant du stock d'azote disponible, une mauvaise prise en compte du surcroît d'azote fourni par la minéralisation et des irrigations aboutissant à des flux drainants significatifs sont encore fréquemment observés. Des niveaux de drainage atteignant 25 % à 30 % des apports d'eau (pluies + irrigation) sont fréquemment observés en cultures légumières sur des sols à texture grossière, y compris en irrigation en goutte à goutte [20, 28, 91, 105, 115]. Les techniques plus traditionnelles d'irrigation, comme l'irrigation à la raie encore pratiquée dans

certaines régions du monde, peuvent générer des taux de drainage encore plus important dépassant les 50 % [94]. Il est bien établi que des méthodes de programmation de l'irrigation, basées sur des mesures de demande climatique ou des capteurs de l'état hydrique du sol permettent d'augmenter l'efficacité de l'eau et de limiter le drainage [30, 87, 96, 110]. Les capteurs modernes de l'état hydrique du sol, connectés et transmettant l'information en continu, sont abordables financièrement et simples d'usage [17]. Néanmoins une étude récente sur les pratiques d'irrigation en cultures légumières en France a montré que l'usage de capteurs pour la gestion de l'irrigation était peu répandu [81]. Au-delà du déclenchement raisonné des irrigations, l'adaptation spatiale des points source en cas d'irrigation localisée (par exemple en enterrant les goutteurs) et le découplage des événements d'irrigation et de fertilisation en limitant l'injection d'engrais à la fin du cycle d'irrigation, permettent de diminuer les pertes par lixiviation [33, 38, 113].

PERTES GAZEUSES

Les pertes gazeuses correspondent à deux types de phénomènes : la volatilisation de l'ammonium NH_4^+ en ammoniac gazeux NH_3 et la production d'oxyde nitrique (NO) et d'oxyde nitreux (N_2O) lors des processus de nitrification ou de dénitrification (Cameron *et al.*, 2013, [18]).

L'ammonium du sol provient de la minéralisation de la matière organique, de l'apport d'engrais contenant de l'ammonium (ammonitrate et autres sels d'ammonium) ou de précurseurs comme l'urée ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) ou encore des déjections animales épandues au sol. La transformation de l'ammonium en ammoniac correspond à une réaction acide/base, dont la constante de réaction dépend du pH. Le pKa du couple $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ étant assez élevé, la formation d'ammoniac en solution et sa volatilisation sont favorisées dans les milieux alcalins. Cependant l'hydrolyse de l'urée a un effet temporairement alcalinisant et des pertes d'ammoniac gazeux peuvent se produire dans des sols neutres ou acides après des apports d'urée ou d'urine animale [18]. Plusieurs autres fac-

teurs, comme la température, le rayonnement, la vitesse du vent, la teneur en eau, le mode d'épandage ou la profondeur d'enfouissement des engrais et des produits résiduels organiques PRO ont une influence sur la volatilisation [89, 90]. Le processus de volatilisation de l'ammonium est généralement limité aux quelques heures ou jours qui suivent l'apport d'engrais ou de PRO. On définit le facteur d'émission (abrégé sous sa forme anglaise EF) comme la fraction de l'azote apporté perdu sous forme gazeuse, après avoir soustrait les émissions

du même sol sans apport de fertilisant. Suivant la nature du produit épandu, le mode d'application, le type de sol et les conditions environnementales, l'EF peut varier d'une valeur quasi nulle à plus de 40 % de la quantité d'azote apporté. Les risques de volatilisation les plus élevés concernent les déjections animales ainsi que l'urée et le bicarbonate d'ammonium des engrais [18]. Les chiffres disponibles sur les émissions ammoniacales en cultures légumières sont presque exclusivement issus de travaux réalisés en Chine et à notre



> DIAGNOSTIC DES PERTES AZOTÉES GAZEUSES : (A) DISPOSITIF DE MESURE DES CONCENTRATIONS EN AMMONIAC À PLUSIEURS HAUTEURS EN LIGNE (ROSAA), NÉCESSITANT UN COUPLAGE AVEC DES MESURES MICROMÉTÉO POUR LE CALCUL DES ÉMISSIONS ET (B) COUPELLE AVEC TROIS BADGES ALPHA UTILISÉS POUR LA MESURE DE CONCENTRATION EN AMMONIAC ATMOSPHÉRIQUE.

connaissance il n'y a pas eu de travaux publiés sur la volatilisation d'ammoniac dans les divers types de systèmes légumiers français. Les valeurs rapportées dans la littérature donnent un EF moyen de 8 % environ avec d'importantes variations d'une étude à l'autre. Les émissions instantanées peuvent atteindre lors des pics, plusieurs centaines de mg $\text{N-NH}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ et les pertes globales atteindre 30-40 kg $\text{N-NH}_3 \cdot \text{ha}^{-1}$ dans une saison de culture [8, 53, 54, 59, 99, 111]. Les techniques de mesure peuvent avoir une influence importante sur les résultats, en particulier sous serre et abri où les dynamiques de flux d'air modifient fortement les émissions [54].

Les émissions d'oxyde nitrique NO et d'oxyde nitreux N_2O représentent une part significative des émissions de gaz à effet de serre et contribuent à la déposition d'acide nitrique ainsi qu'à la résorption de la couche d'ozone. À l'échelle globale, les sols, cultivés ou non, sont responsables de près des deux tiers des émissions globales d'oxyde nitreux N_2O [98]. Les émissions de d'oxyde nitrique NO et d'oxyde nitreux N_2O résultent des transformations bactériennes et fongiques de l'azote du sol, soit lors du processus de dénitrification, défini comme la réduction partielle ou totale en condition anaérobie de l'ion nitrite NO_2^- en N_2 , soit lors du processus de nitrification, qui est la transformation aérobie de l'ammonium en nitrite. Selon les auteurs, un ou deux mécanismes supplémentaires peuvent être identifiés : la dénitrification par les microbes assurant la nitrification (processus appelé en anglais « nitrifier dénitrification ») et l'ammonification du nitrate [7]. Les conditions du milieu (température, humidité, texture du sol) influent beaucoup sur la prédominance de l'un ou l'autre des mécanismes. Au-delà des conditions oxydantes ou réductrices résultant essentiellement de la saturation en eau des pores du sol, le pH, la teneur en carbone du sol, la température et les interventions anthropiques (travail du sol, apport d'azote minéral ou organique) peuvent modifier l'intensité des émissions gazeuses [55]. Du fait des conditions particulières associées à chaque mécanisme produisant des oxydes nitriques ou nitreux gazeux, les émissions sont, comme pour la volatilisation de l'ammoniac, discontinues dans le temps. En cultures légumières,



> COURS D'EAU EUTROPHISÉ

des pics d'émission de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de microgrammes de $\text{N}_2\text{O} \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ peuvent être mesurés [3, 26, 58, 69, 71, 72]. Les facteurs d'émission EF sont généralement compris entre 0,5 % et 5 % selon les études, parfois au-delà. Aux États-Unis, les émissions annuelles moyennes d'oxyde nitreux N_2O en cultures légumières ont été estimées entre 6 et 9 kg $\text{N}_2\text{O} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$. Deux méta-analyses récentes donnent des visions assez contrastées des spécificités des cultures légumières. Dans la première (Rashti *et al.*, 2015, [77]), les émissions saisonnières moyennes d'oxyde nitreux N_2O en cultures légumières équivalaient à un facteur d'émission EF de 0,97 %, une valeur proche de celle des grandes cultures et de la valeur de 1 % retenue par le GIEC dans ses calculs d'émissions de gaz à effet de serre. Dans la seconde [55], le facteur d'émission EF saisonnier moyen des cultures légumières serait de 2,42 % pour l'oxyde nitreux N_2O et 1,71 % pour l'oxyde nitrique NO, avec des émissions, pour l'ensemble des deux gaz, plus de 2,5 fois plus élevées que celles enregistrées en grandes cultures. Les deux études s'accordent en revanche pour signaler qu'à cause des apports très élevés de fertilisants en cultures légumières, les quantités globales d'oxyde nitrique NO et d'oxyde nitreux N_2O émises sont importantes : elles représenteraient à l'échelle mondiale 9 % des émissions d'oxyde nitreux N_2O issues des apports d'engrais azotés de synthèse [77].

Une gestion rigoureuse du système sol-plante permet de limiter les pertes

gazeuses comme les pertes par lixiviation. Le coût des excès d'azote rejetés dans l'environnement est estimé supérieur à la valeur de la production permise par les engrais azotés (Sutton *et al.*, 2011, [95]). Des règles générales sont à appliquer dans les systèmes légumiers, tout comme dans les systèmes de grandes cultures : augmenter l'efficacité de l'azote en synchronisant l'offre en azote minéral du sol aux besoins des plantes ; appliquer en combinaison de l'azote minéral et de l'azote organique ; enfouir les engrais et amendements à base d'urée ou d'ammonium ; veiller aux conditions de pH et de saturation en eau de l'espace poral ; mettre en place des cultures intermédiaires et adapter les successions culturales. Le recours à diverses technologies supplémentaires (choix de variétés efficaces en azote [109], utilisation d'engrais à libération lente ou d'inhibiteurs de nitrification ou addition de biochar) peut, à l'instar des grandes cultures, être envisagé en systèmes légumiers. Un examen propre à chaque condition de production est nécessaire, afin d'évaluer globalement l'impact des choix techniques, qui ne sont pas toujours concordants dans leur bénéfice pour l'environnement. Par exemple certaines pratiques jugées vertueuses vis-à-vis du stockage du carbone, comme le travail réduit du sol ou l'augmentation de la quantité de matière organique du sol, peuvent renforcer les émissions potentielles d'oxydes nitriques et nitreux en conditions dénitrifiantes [6, 86]. ■

PRATIQUES DE FERTILISATION EN CULTURES LÉGUMIÈRES

CONFUSIONS POSSIBLES AUTOUR DE LA NOTION D'EFFICIENCE DE L'ENGRAIS

La base du raisonnement de la fertilisation en cultures légumières en France, telle que rappelée dans un document du CTIFL (2012), est la même que celle de toutes les autres cultures et repose sur le principe suivant :

Apport d'engrais efficace = besoin des cultures – offre du sol

Ce principe est celui qui a conduit au concept d'équation d'efficacité (Se référer à l'encadré « Équation d'efficacité, coefficient apparent d'utilisation de l'engrais, et efficacité d'utilisation de l'azote »). L'équation d'efficacité simplifie le bilan azoté, dans la mesure où certains termes difficilement accessibles, comme la minéralisation des différents compartiments organiques, les pertes gazeuses ou les pertes par lixiviation ne sont plus quantifiées directement. Son utilisation effective dans une situation donnée suppose de connaître le coefficient apparent d'utilisation CAU et de disposer d'informations sur la fourniture d'azote à la culture dans des situations sans apport d'engrais azoté. Cela repose sur la mise en place d'un grand nombre d'expérimentations permettant d'estimer ces termes. Or très peu d'essais de ce type ont été conduits en cultures légumières en France à des fins opérationnelles. D'autre part, si la gamme de variation du coefficient apparent d'utilisation CAU peut être estimée expérimentalement dans des situations agronomiques types, il est bien établi que le coefficient apparent d'utilisation CAU peut varier dans des proportions considérables d'un contexte agronomique à un autre. En cultures légumières, à l'échelle mondiale, des variations de coefficient apparent d'utilisation CAU entre 10 % et 80 % sont rapportées [59, 88, 101, 111]. C'est également le cas pour l'efficacité d'absorption de l'azote [114]. Souvent, les fortes restitutions organiques ou les lessivages importants font baisser le coefficient apparent d'utilisation CAU. D'autre part, il est bien établi que le coefficient apparent d'utilisation CAU diminue avec la quantité d'engrais

ÉQUATION D'EFFICIENCE, COEFFICIENT APPARENT D'UTILISATION DE L'ENGRAIS (CAU) ET EFFICACITÉ D'UTILISATION DE L'AZOTE

À partir du principe selon lequel l'apport d'engrais efficace se calcule par la différence entre les besoins en azote des cultures et l'offre du sol, a été proposée l'équation d'efficacité, écrite comme suit :

$$X = \frac{(Pf - PO)}{CAU}$$

où X (kg.ha⁻¹) est la quantité d'azote minéral à apporter avec l'engrais, Pf (kg.ha⁻¹) est la quantité d'azote absorbée par la culture avec apport d'engrais, PO (kg.ha⁻¹) est la quantité d'azote absorbée sans apport d'engrais et CAU est le coefficient apparent d'utilisation de l'engrais (sans unité, compris entre 0 et 1, ou entre 0 % et 100 % lorsqu'il est exprimé en pourcentage). L'interprétation de l'équation d'efficacité est sans équivoque : elle indique que l'engrais à apporter doit correspondre au besoin des plantes duquel on déduit ce qui est fourni par le sol, en tenant compte d'un coefficient qui rend compte de la fraction de l'engrais apporté qui pourra réellement être absorbé par les plantes. Le plus souvent, la quantité d'azote absorbée Pf n'est quantifiée que pour les parties aériennes et l'azote contenu dans les racines, difficile à quantifier, n'est pas comptabilisé.

Dans la littérature internationale on trouve le CAU (appelé Apparent N Recovery) mais également la notion d'efficacité d'utilisation de l'azote (Nitrogen Use Efficiency, NUE en anglais) : elle est définie dans son acception courante par le rapport entre la biomasse ou le rendement produit et la quantité d'engrais azotée apportée. Elle est souvent décomposée par le produit d'une efficacité d'acquisition de l'azote (Nitrogen uptake efficiency, NUpE) par une efficacité d'utilisation de l'azote (Nitrogen utilization efficiency, NUtE) :

$$NUE = NUpE \times NUtE = \frac{Pf}{X} \times \frac{Biomasse}{Pf} = \frac{Biomasse}{X}$$

où Biomasse (en kg.ha⁻¹ ou t.ha⁻¹ de matière sèche) représente selon les études la matière sèche totale produite, la matière sèche aérienne (les racines sont alors exclues) ou la matière sèche récoltée. La NUpE est donc un indicateur répondant à la même logique que le CAU mais à la différence de ce dernier la NUpE comptabilise l'azote prélevé par la plante quel que soit son origine, engrais ou sol. Quant au NUtE, c'est biologiquement l'inverse d'une teneur en azote.

Des variations entre les termes et leurs définitions exactes sont fréquemment rencontrées dans la littérature technique et scientifique, il convient donc d'être vigilant, lorsque l'on recherche des références chiffrées, à l'explicitation précise des notions employées.

apportée, le pourcentage de perte d'engrais dans l'environnement étant lié à la dose appliquée [23, 88]. Ainsi en toute logique le coefficient apparent d'utilisation CAU doit être adapté à la valeur du terme PO, une plus grande fourniture d'azote du sol devant conduire à appliquer moins d'engrais et de manière plus efficace.

Malgré sa similarité avec l'équation d'efficacité, le principe « apport = besoin - offre » peut prêter à confusion. D'une part, parce que dans cette dernière formulation le coefficient apparent

d'utilisation CAU est implicite et parfois négligé en pratique (on considère alors que 100 % de l'engrais est efficace) et d'autre part parce que l'offre du sol peut être entendue dans son sens littéral, c'est-à-dire la somme du stock d'azote minéral et de la minéralisation nette pendant la culture, quantité qui peut être très éloignée de ce que la plante prélève dans le cas où une partie de l'azote minéral issu du sol est perdue dans l'environnement ou si une fraction de cet azote minéral n'est pas en contact direct avec la rhizosphère. Ainsi, un

écueil serait de considérer l'approche « apport = besoin – offre » comme une simplification extrême de la méthode du bilan, où les pertes ne seraient pas prises en compte. Dans l'équation d'efficacité, les pertes sont implicitement contenues dans le coefficient apparent d'utilisation CAU et dans le fait que PO correspond à « l'offre du sol » à laquelle est retranché l'azote minéral qui n'est pas utilisé par les plantes. Une étape simplificatrice supplémentaire est celle où le stock d'azote minéral du sol est mesuré (Nmin) sans que la minéralisation nette, plus difficile à estimer, ne soit prise en compte. Cela revient alors à estimer les besoins en engrais comme la quantité prélevée par la culture moins le stock d'azote minéral disponible.

Le principe ci-dessus peut aussi être confondu avec les différentes approches de calcul de la fertilisation des légumes développées en Europe, qui sont souvent proposées pour déterminer la quantité d'engrais à apporter en cours de culture (Thompson *et al.*, 2017, [97]). La plus simple d'entre elles propose d'apporter la quantité correspondant à la différence entre une valeur cible et l'azote minéral disponible dans le sol. Cette valeur cible dépend de la culture, du stade de celle-ci et de la minéralisation estimée dans le système de production. Dans la méthode KNS (Kulturbegleitende Nmin Sollwerte), développée en Allemagne [112], la minéralisation devient un terme explicite de l'équation, écrite comme suit :

$$X = N_{\text{objectif}} - \text{Minéralisation} - N_{\text{min}}$$

où X est la dose d'engrais azoté à apporter, Minéralisation est la quantité d'azote minéralisé pendant la période concernée et Nmin le stock d'azote minéral du sol. N_{objectif} est défini comme la somme de deux termes, N_{culture} et N_{tampon} où N_{culture} est le prélèvement en azote de la culture pendant la période considérée et N_{tampon} la quantité minimale d'azote minéral du sol à la fin de la période considérée, en deçà de laquelle la production est pénalisée, soit en quantité, soit en qualité. Un développement supplémentaire a été proposé au début des années 2000 [34], où la minéralisation devient une « minéralisation apparente » tenant compte implicitement du fait que de l'azote peut être soit perdu dans l'environnement, soit immobilisé. Une approche similaire à la méthode KNS a été développée en Suisse et en Chine [80]. Ces outils supposent que des références expérimentales existent,

sur un grand nombre de cultures, permettant de fixer les valeurs contextuelles concernant les besoins des cultures au fur et à mesure que l'on avance dans le cycle, les niveaux minimaux d'azote minéral du sol à maintenir aux différentes étapes du cycle, la minéralisation globale et un coefficient de perte à appliquer à cette minéralisation globale. Leur mise en œuvre suppose une ou plusieurs mesures du stock d'azote minéral au cours du cycle, en fonction du nombre d'apports de fertilisants pendant celui-ci. Malgré les contraintes que cela impose aux praticiens, qui ne sont pas toujours favorables à une multiplication des analyses de sol pendant les cultures, ces méthodologies sont quasi généralisées dans certains pays européens. Bien calibrées, elles permettent une diminution importante des quantités de fertilisants appliqués et des pertes d'azote dans l'environnement, en comparaison avec des stratégies d'apport de quantités fixes d'azote, non ajustées à partir de prise d'information sur le statut azoté du sol.

DES PRATIQUES DIFFÉRENCIÉES SELON LES CULTURES ET LES RÉGIONS

Les principes et les bases scientifiques rappelés ci-dessus sont repris par les organismes techniques et les conseillers,

avec une très grande variabilité d'adaptation régionale, pour préconiser des pratiques de fertilisation.

Les cultures légumières industrielles (pois, haricot, épinard, carotte...) se rapprochent par leur mode de production des grandes cultures et ne rencontrent pas les difficultés, identifiées plus haut, inhérentes à l'application de la méthode du bilan sur les parcelles à larges inters-rangs et/ou en irrigation localisée. En conséquence, un bilan formel est préconisé sur ce type de cultures par l'Union nationale interprofessionnelle des légumes transformés (UNILET). Néanmoins, les référentiels disponibles étant moins nombreux dans ces cultures, certains termes de l'équation du bilan peuvent s'avérer difficiles à estimer. Aussi parfois le bilan n'est pas calculé et les recommandations se limitent à des doses plafond de fertilisant azoté, correspondant aux besoins maximaux des cultures. Afin d'alimenter les usines sur les plus larges périodes possibles, les plannings de production sont étalés. Les conditions des cycles culturaux sont variables d'un calendrier à l'autre, ce qui complique l'acquisition de références empiriques.

Une autre approche est la grille de calcul de la fertilisation des cultures légumières proposée au début des années 2010 par le Pôle Légume Région Nord et la Chambre régionale d'Agriculture des Hauts de France. Cette approche est



> PRATIQUES DE FERTILISATION AZOTÉE : L'APPORT D'AZOTE PEUT SE FAIRE À TRAVERS DIVERSES PRATIQUES TELLES QUE (A) LA PULVÉRISATION D'ENGRAIS LIQUIDES, EN APPLICATION AU SOL OU FOLIAIRE, (B) L'APPLICATION D'ENGRAIS SOLIDES (TESTUD, F. ENGRAIS MINÉRAUX. EMC - TOXICOL.-PATHOL., 2004, 1 (1), 21-28. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.EMCTP.2003.10.002](https://doi.org/10.1016/J.EMCTP.2003.10.002)) OU ENCORE (C) L'APPORT PAR FERTIRRIGATION EN GOUTTE À GOUTTE OU ENTERRÉ.

réglementaire en « zone vulnérable nitrates » (ZVN, cf. paragraphe Contraintes réglementaires et de marché) et le principe « apport d'engrais = besoins – apport du sol » y est repris. La notice fait mention d'un coefficient apparent d'utilisation CAU, qui varierait entre 0,8 et 1,2, au sujet duquel il est dit qu'il n'existe pas de modèle expert pour le calculer et que c'est au producteur d'en déterminer la valeur en fonction de ce qu'il connaît de ses sols. Le fait que la fourchette de valeurs proposée de ce coefficient apparent d'utilisation CAU soit élevée et qu'elle puisse dépasser 1 indique que le coefficient apparent d'utilisation CAU est défini ici comme le rapport entre le prélèvement d'azote du peuplement et la quantité d'engrais apportée, c'est-à-dire une efficacité d'absorption de l'azote (en anglais N uptake efficiency qui lui peut dépasser 1) et non un coefficient apparent d'utilisation CAU. Quoi qu'il en soit, ce « coefficient apparent d'utilisation CAU » est mentionné mais non considéré dans le calcul de l'engrais. La grille de calcul prend en compte les cas où plusieurs cultures sont réalisées la même année sur une parcelle. Une quantité minimale d'azote non utilisable par la culture (l'équivalent du N_{tampon} de la méthode KNS), comprise entre 20 et 30 kg N.ha⁻¹, est ajoutée aux besoins totaux. L'offre du sol est la somme du stock initial (reliquat azoté sortie d'hiver) et de différents termes de minéralisation de l'humus, des résidus des précédents, des apports organiques frais, des apports organiques antérieurs, des résidus des cultures intermédiaires et du retournement d'une prairie le cas échéant. Ces quantités d'azote minéral issues des transformations biologiques dans le sol ne sont pas calculées mais les valeurs sont fournies par des tableaux contextuels. Cette démarche se rapproche donc de la méthode KNS décrite plus haut, à la différence qu'elle fixe les besoins prévisionnels en début de culture et qu'il n'y a pas d'adaptation de la fertilisation au cours du cycle en fonction de mesures répétées de Nmin. En Bretagne, l'outil diffusé chez les praticiens depuis 2008 (et là aussi réglementaire en zone vulnérable nitrates ZVN), se fonde sur les besoins en azote par culture, ajustés en fonction du précédent cultural. Trois classes de précédents « riche », « moyennement riche », ou « pauvre » sont considérées en fonction de l'espèce et, dans certains cas, en



> FÉVEROLE ET TRÈFLE CULTIVÉS EN TANT QU'ENGRAIS VERTS

fonction de critères agronomiques qualifiant la production. Ils permettent de déterminer les doses maximales d'engrais azoté efficace (minéral + organique) à apporter. Une grille régionale générale et une grille spécifique dédiée aux terres sableuses d'une partie du territoire sont disponibles. Les producteurs ont la possibilité, via la chambre d'agriculture, de réaliser des analyses d'azote minéral en début de saison. Il n'y a cependant pas de règle établie pour interpréter l'analyse de sol afin d'ajuster la fertilisation azotée. C'est également le cas pour les cultures intensives de mâche ou de radis. En Loire-Atlantique, celles-ci sont semées sous abri froid ou tunnel nantais à partir d'octobre, avec trois à quatre cycles culturaux qui se succèdent. Les apports d'azote correspondent généralement aux mobilisations des cultures (70 kg N.ha⁻¹ pour la mâche et 60 kg N.ha⁻¹ pour le radis) et peuvent être modulés en fonction de mesures de Nmin, sans pour autant qu'un formalisme explicite la manière d'ajuster la fertilisation au stock d'azote du sol. Des approches similaires sont observées en culture de laitue sous abri : succédant souvent à des cultures d'été ou à des cultures intermédiaires, la fertilisation du premier cycle en début d'automne peut être ajustée empiriquement suite à une mesure du Nmin. Dans le ou les cycle(s) suivant(s), l'engrais azoté est souvent apporté à une dose équivalente aux exportations, soit environ 100 kg N.ha⁻¹ (pour une densité de 12 à 14 plantes/m²). Dans tous ces cas, l'absence de règle formelle d'interprétation de Nmin et de son utilisation pour calculer la dose d'engrais laisse une grande liberté aux praticiens et à leurs conseillers.

Sur les cultures dont le cycle est assez long (artichaut, chou-fleur, carotte, oignon, poireau, pomme de terre primeur...), un fractionnement des apports d'azote est parfois conseillé. Le fractionnement de la fertilisation est parachevé avec les techniques de fertirrigation, quasi généralisées pour les cultures de solanacées (tomate, poivron, aubergine, piment) et cucurbitacées (melon, concombre, courgette) dans le sud de la France. Dans ces derniers cas, c'est un apport de fond avant la culture qui est raisonné en fonction de la mesure de Nmin. En cours de culture, quelques semaines après la plantation, l'apport d'engrais est généralement ajusté de manière hebdomadaire. Les doses d'azote ont longtemps été déterminées de manière plus ou moins empirique, variant par exemple entre 10 et 20 kg N.ha⁻¹.semaine⁻¹ pour la tomate. Le développement depuis 2005 par le CTIFL, avec le soutien de l'INRA, de l'outil PILazo® sur les cultures légumières, a permis d'objectiver la dynamique des besoins en engrais des plantes. La mesure à une date donnée de la concentration de l'ion nitrate dans les sèves permet d'estimer la concentration en azote dans le végétal. Cette concentration peut être comparée à la concentration critique d'azote [Nc] dans la plante au stade où est faite la mesure. Le rapport entre la concentration mesurée et la concentration critique détermine l'indice de nutrition azotée INN de la plante. L'apport d'azote est conditionné aux situations où l'indice de nutrition azotée est supérieur à un (INN < 1) : la dose à apporter est alors déterminée par des grilles de décisions en fonction de cet état nutritionnel. La méthode

Zenit est une approche « sol » mise au point dans les années 1990 par la station SERAIL, mais elle n'a été développée que sur un nombre limité de cultures (laitue, courgette, chou, blette, cardon). Elle est basée, à l'encontre de PILazo®, sur une analyse du stock d'azote minéral du sol en cours de culture et se rapproche des outils type KNS. En fonction de la période dans le cycle de culture, un niveau minimal d'azote minéral est recommandé et la mesure permet de décider de l'apport ou non de fertilisant pour ajuster le stock au niveau désiré.

TYPES D'ENGRAIS AZOTÉS ET AMENDEMENTS EN CULTURES LÉGUMIÈRES

L'azote est présent dans une grande variété d'engrais et d'amendements, dont l'usage varie en fonction des régions et des systèmes de production. On privilégie dans certaines productions les engrais simples, tandis que dans d'autres les engrais mixtes N-P205-K20 (+Mg et/ou Ca), avec des équilibres variables entre les éléments, sont plus répandus. Dans ce dernier cas, c'est souvent la quantité d'azote de l'engrais qui détermine le choix des doses. En conséquence, les apports des autres éléments peuvent ne pas être adaptés aux besoins des cultures, même s'il existe un grand nombre de formulations commerciales avec des équilibres variés. Par exemple en PACA des produits de type 15-10-30 sont épanchés depuis plusieurs décennies sur plusieurs espèces fertirriguées, alors que les besoins des plantes se situent plutôt dans des rapports N : P proches de 10 : 1 en masse. L'usage généralisé de tels engrais dont le rapport N : P est d'environ 10 : 3 aboutit inéluctablement à une accumulation de phosphore P dans les sols. Inversement, l'utilisation d'outils de suivi des besoins des plantes peut contribuer ponctuellement à diminuer assez fortement les quantités d'engrais complets, sur la base des besoins en azote. La diminution des apports potassiques qui s'ensuit peut faire craindre, pour des cultures exigeantes comme les solanacées, des problèmes de qualité des fruits. Les cycles biogéochimiques sont en effet très différents entre ces éléments minéraux. Une gestion précise de la fertilisation et de la fertilité des sols repose indubita-

blement sur une approche élément par élément. L'usage d'engrais complets est à cet égard moins aisé que celui d'engrais simples.

Des évolutions récentes se dessinent pour la fertilisation azotée des cultures légumières. En premier lieu, la fertilisation à base d'engrais minéraux semble reculer au profit d'apports d'engrais organiques ou organo-minéraux. Les expériences d'utilisation de produits organiques en agriculture biologique (AB) ont favorisé leur développement en agriculture conventionnelle. La mise à disposition d'azote minéral est plus progressive avec les produits organiques. Les risques de perte d'azote dans l'environnement en début de culture quand les besoins des plantes sont faibles sont diminués, mais les conséquences sur les émissions gazeuses semblent plus mitigées (Aguilera *et al.*, 2013, [1]). Les engrais « retard », généralement à base d'urée, sont soit des associations d'urée avec du formaldéhyde ou de l'isobutyraldéhyde, soit des enrobages où les minéraux sont encapsulés dans des résines ou des polymères, ce qui retarde leur libération [60]. L'usage de ces engrais « retard » est modeste dans les cultures légumières en France et en Europe, en raison de leur coût et d'un intérêt limité des praticiens pour cette technologie dont l'intérêt essentiel est environnemental car elle limite potentiellement les fuites d'azote nitrique [97]. Ce type d'engrais est néanmoins utilisé dans quelques productions en France, notamment dans certaines exploitations de production de mâche, radis, ou jeunes pousses dans l'ouest du pays. Une mauvaise connaissance des cinétiques de minéralisation de ces produits peut complexifier leur utilisation.

En complément de ces engrais et amendements, de nombreux biostimulants sont intégrés depuis peu dans les systèmes de productions légumières. Ces derniers sont définis par le journal officiel de l'Union Européenne par le règlement UE 2019/1009 comme « produits qui stimulent les processus de nutrition des végétaux indépendamment des éléments nutritifs qu'ils contiennent, dans le seul but d'améliorer une ou plusieurs des caractéristiques suivantes des végétaux ou de leur rhizosphère : l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs ; la tolérance au stress abiotique ; les caractéristiques qualitatives ; la disponibilité des éléments nutritifs confinés

dans le sol ou la rhizosphère». Parmi les exemples des produits largement utilisés, il y a les substances humiques qui stimulent l'activité biologique des sols, les mycorhizes qui peuvent favoriser l'absorption du phosphore et les bactéries du genre *Rhizobium* qui fixent de l'azote atmosphérique pour les espèces de la famille des légumineuses.

CONTRAINTES RÉGLEMENTAIRES ET DE MARCHÉ

Un programme national d'actions, décliné en plans régionaux, vise à mettre en œuvre des mesures limitant la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole, conformément à la directive européenne « Nitrates » de 1991. Depuis 2013, des arrêtés préfectoraux sont publiés pour établir des référentiels de mise en œuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée, applicables en « zone vulnérable nitrates » (ZVN). Les contenus de ces référentiels ont été proposés par des groupes régionaux d'expertise nitrates (GREN), regroupant des experts des filières, des scientifiques, des représentants publics et des porteurs d'enjeux (Tableau 1). Les règles sont spécifiques à chaque type de production. Pour les cultures légumières, elles consistent pour la plupart des espèces et des régions en des doses plafond autorisées, correspondant à la dose maximale d'azote efficace (issue de l'engrais, des PRO et le cas échéant de l'eau d'irrigation) (voir Tableau GREN). Dans trois régions (Grand-Est, Hauts-de-France, Centre), quelques légumes d'industrie



> GRANULÉS D'ENGRAIS ORGANIQUES À BASE DE FIENTES DE VOLAILLES SÉCHÉES

et de plein champ, comme la carotte, l'oignon, l'épinard ou le haricot, sont réglementés à partir de la méthode du bilan. En Bretagne, une équation simplifiée, faisant apparaître le stock minéral à la plantation, la minéralisation du précédent et l'arrière-effet des amendements organiques, est utilisée pour la carotte, le chou-fleur, le brocoli, le céleri-rave, l'épinard et le haricot. Pour les autres légumineuses, la dose plafond varie en fonction d'un facteur appelé « richesse du précédent », avec trois classes de précédents culturaux – « riche », « moyennement riche » ou « pauvre » – qui restituent des quantités plus ou moins importantes d'azote lors de la culture légumière. Cette approche est également utilisée en Auvergne-Rhône-Alpes. En Occitanie, sur le territoire correspondant à l'ancienne région Languedoc-Roussillon, la fertilisation azotée peut être revue à la baisse par rapport à la dose plafond, en fonction d'une équation de besoin reliée par une fonction affine au rendement. C'est également le cas en Provence-Alpes-Côte d'Azur, où la dose plafond n'est pas explicite pour la plupart des cultures et doit être calculée à partir du rendement objectif. Dans les autres régions, Normandie, Île-de-France, Pays-de-la-Loire, Bourgogne-Franche-Comté et Nouvelle-Aquitaine ainsi que dans la partie ouest de l'Occitanie, les doses plafond ne sont pas liées au rendement. D'importantes disparités existent d'une région à l'autre, pour une même espèce, dans les doses plafond. Certains écarts peuvent être justifiés par le mode de mise en production de l'espèce, la durée de sa culture et les conditions climatiques qui déterminent les potentiels de rendement. Cependant les écarts interrégionaux ne sont probablement pas tous liés à des différences d'objectif de rendement et laissent supposer des différences d'expertise au sein des GREN. Pour la courgette, par exemple, les doses plafond vont de 110 kg N.ha⁻¹ en Bretagne à 300 kg N.ha⁻¹ en Bourgogne-Franche-Comté (rendement non communiqué), en Pays-de-la-Loire (pour un rendement de 100 t.ha⁻¹) et en Nouvelle-Aquitaine (pour un rendement moyen de 45 t.ha⁻¹). On trouve des valeurs intermédiaires dans les autres régions : 160 kg N.ha⁻¹ en Occitanie (dans la zone ex-Midi-Pyrénées), 180 kg N.ha⁻¹ en Centre, Île-de-France (rendement moyen de référence de 21 t.ha⁻¹) et Grand-Est, 220 kg N.ha⁻¹ en Normandie



> ESSAI DE MISE AU POINT D'OUTIL DE FERTILISATION SUR TOMATE

et 280 kg N.ha⁻¹ dans les Hauts-de-France. En Provence-Alpes-Côte d'Azur, la dose plafond calculée est de 225 kg N.ha⁻¹ pour un rendement de 70 t.ha⁻¹, tandis qu'en Occitanie l'équation donne 270 kg N.ha⁻¹ pour le même rendement de 70 t.ha⁻¹. Pour ce potentiel de rendement de 70 t, la dose plafond en Auvergne-Rhône-Alpes varie entre 150 et 210 kg N.ha⁻¹ suivant la classe de précédent – de riche à pauvre. Des disparités de même nature peuvent être identifiées chez la plupart des espèces. Pour certaines, des valeurs très élevées de plafond sont observées dans une région particulière. Ainsi, par exemple, le plafond pour la laitue en région Auvergne-Rhône-Alpes, en précédent « pauvre », est de 180 kg N.ha⁻¹, pour un rendement régional indicatif de 35 t.ha⁻¹. Les prélèvements d'azote pour ce niveau de biomasse variant entre 50 et 80 kg N.ha⁻¹, ce plafond apparaît donc extrêmement élevé. Une remise à plat des données scientifiques sur les besoins des espèces et une coordination interrégionale des GREN semblerait nécessaire pour déterminer des méthodologies et des valeurs d'usage cohérentes à l'échelle nationale. Différentes incitations commerciales influencent également les pratiques de fertilisation azotée des cultures légumières. En premier lieu, seuls les fertilisants et amendements organiques sont autorisés en agriculture biologique, ce qui incite les producteurs à utiliser d'importants volumes de produits résiduels organiques PRO, en particulier les composts. Les cultures intermédiaires jouent également un rôle important de recyclage de l'azote à l'échelle de la rotation. Les difficultés inhérentes à la fertilisation

en agriculture biologique ont été bien identifiées (Gaskell et Smith, 2007, [22, 39, 56]). La principale difficulté est la synchronisation de la transformation de l'azote organique en azote minéral avec l'évolution du prélèvement des cultures : l'azote de l'engrais organique doit être libéré en suivant la cinétique des besoins des plantes, sinon des pertes environnementales (en cas de libération excessive) ou des baisses de croissance (en cas de libération insuffisante) peuvent survenir. L'utilisation de fertilisants organiques en cours de culture permet partiellement de remédier au problème, mais l'usage de ce type de produits demande de veiller à la répartition homogène sur la culture et de surveiller les risques de bouchage des goutteurs en fertilisation localisée avec des gaines [39]. Une autre question porte sur l'approvisionnement en matières organiques, quand celles-ci ne sont pas recyclées au sein de la ferme, ce qui représente une majorité de situations [63]. Les cahiers des charges commerciaux ont aussi une influence importante sur les pratiques de fertilisation azotée. D'une situation à l'autre, les contraintes sont plus ou moins explicites. La démarche Global Gap contraint les producteurs à justifier de bonnes pratiques agricoles et à utiliser des outils de raisonnement de la fertilisation. D'autres cahiers des charges peuvent restreindre l'utilisation de certains produits. Ainsi les PRO issus de déjections animales ne sont pas recommandés dans certaines filières, en particulier de légumes d'industrie ou certains légumes feuilles. Certains industriels interdisent également l'épandage sur cultures légumières de boues issues de station d'épuration des eaux. ■

TABLEAU 1 : MÉTHODE ET VALEURS RETENUES DANS LES ARRÊTÉS RÉGIONAUX ÉTABLISSANT LE RÉFÉRENTIEL DE MISE EN ŒUVRE DE L'ÉQUILIBRE DE LA FERTILISATION AZOTÉE POUR LES CULTURES LÉGUMIÈRES

	Auvergne-Rhône-Alpes		Bourgogne		Bretagne		Centre-Val de Loire		Grand-Est		Hauts-de-France	
Ail	PL	170					PL	120	PL	130	PL	150
Artichaut	PL	150	PL	180	PL	120	PL	120	PL	150	PL	120
Asperge	PL	180	PL	125			BA ou PL	180	BA ou PL	220	PL	190
Aubergine abri	PL	200	PL	220							PL	370
Bettes/ Cardes	PL	250					BA ou PL	280	PL	180	PL	220
Brocolis	PL	180			BS ou PL	150	BA	280	PL	200	PL	200
Carotte primeur			PL	110	BS		BA ou PL	120				
Carotte saison	PL	160	BA ou PL	165	BS ou PL	140	BA ou PL	180	BA ou PL	120	BA	
Céleri branche	PL	300					PL	210	PL	220	PL	270
Céleri rave	PL	250	PL	260	BS ou PL	110			BA ou PL	220	PL	270
Chicorée			PL	120			BA ou PL	120	PL	120	PL	150
Chou (vert, frisé, rouge)	PL	260					PL	280	PL	250	PL	270
Chou fleur été	PL	260	PL	330	PL	170	PL	280	PL	250	PL	270
Chou fleur hiver					BS ou PL	200						
Choux de Bruxelles									PL	250	PL	240
Concombre			PL	500			PL	280	PL	200	PL	450
Courgette	PL	210	PL	300	PL	110	PL	180	PL	180	PL	270
Échalotte	PL	170			PL	100	PL	120	PL	120	PL	120
Endive			PL	180	PL	40	BA ou PL	120			BA	
Épinard	PL	170			BS		BA ou PL	180	BA ou PL	190	BA ou PL	220
Fenouil					PL	100	BA ou PL	180	PL	180		
Fraise serre remontante	PL	250	PL	250			PL	210	PL	180		
Haricot (vert, beurre)	PL	90	BA		BS ou PL	120	BA ou PL	120	PL	130	BA	
Laitue	PL	180	PL	90	PL	120	PL	120	PL	120	PL	150
Mâche			PL	70			PL	120			PL	50
Melon plein champ			PL	100					PL	180		
Navet							BA ou PL	180	PL	140	PL	150
Oignon	PL	180	BA ou PL	150	PL	100	BA ou PL	120	BA ou PL	100	BA	
Pastèque									PL	180		
Pomme de terre primeur			PL	175	PL	180	BA ou PL	180	BA ou PL	200		
Persil							PL	210			PL	175
Petit pois	PL	90					PL	50	PL	50	PL	50
Poireau	PL	230	PL	255	PL	190	PL	210	PL	200	PL	220
Poivron			PL	300			PL	210	PL	300	PL	250
Potiron/Courge							PL	180	PL	120	PL	140
Radis	PL	120	PL	60			PL	120	PL	80	PL	80
Tomate abri (1)	PL	250	PL	320							PL	420
Tomate industrie	PL	210	PL	180								
Tomate plein champ	PL	270					PL	180	PL	250		

BA : bilan prévisionnel d'azote ; BS : bilan simplifié ; PL : dose plafond ; PI : dose pivot

⁽¹⁾ Selon les cas il peut s'agir de tomate d'abri froid ou de tomate en culture hors sol chauffée.

TABLEAU 1 (SUITE) : MÉTHODE ET VALEURS RETENUES DANS LES ARRÊTÉS RÉGIONAUX ÉTABLISSANT LE RÉFÉRENTIEL DE MISE EN ŒUVRE DE L'ÉQUILIBRE DE LA FERTILISATION AZOTÉE POUR LES CULTURES LÉGUMIÈRES

	Île-de-France		Normandie		Nouvelle Aquitaine		Occitanie-Midi Pyrénées		Occitanie-LR		Provence-Alpes-Côte d'Azur		Pays de la Loire	
Ail	PL	100	PL	150	PL	150	PL	200	PI	12.5*R	PL	120		
Artichaut	PL	150	PL	150	PL	180	PL	120	PI	11.1*R+50	PI	14*R		
Asperge	PL	150	PL	125	PL	300	PL	120	PI	5*R+110	PL	125	PL	180
Aubergine abri	PL	700			PL	300	PL	400	PI	0.75*R+160	PI	1.6*R+120	PL	350
Bettes/ Cardes	PL	200	PL	220	PL	250	PL	150					PL	200
Brocolis	PL	150	PL	230	PL	230	PL	120						
Carotte primeur	PL	100							PL	110	PI	100-130	PL	200
Carotte saison	PL	100	PL	200	PL	120	PL	100	PI	1.75*R+25	PI	2*R	PL	150
Céleri branche	PL	350	PL	200	PL	220	PL	400	PI	2*R+20			PL	300
Céleri rave	PL	200	PL	300	PL	260	PL	200	PI	2*R+120	PI	3.3*R-7	PL	210
Chicorée	PL	120	PL	150	PL	145	PL	120	PL	150	PL	152	PL	160
Chou (vert, frisé, rouge)	PL	200	PL	300	PL	250	PL	200	PI	1.25xR + 150				
Chou fleur été	PL	200	PL	300	PL	340	PL	200	PL	340	PI	0.02*R-140		
Chou fleur hiver	PL	200							PL	300	PI	0.05*R-300		
Choux de Bruxelles	PL	250	PL	240	PL	210	PL	300	PI	7.5*R+120				
Concombre	PL	500	PL	280	PL	300	PL	600	PI	1.5*R+70	PI	0.13*R+50	PL	450
Courgette	PL	180	PL	220	PL	300	PL	160	PI	3.4*R+33	PI	2.5*R+50	PL	300
Échalotte	PL	120	PL	100	PL	100	PL	110					PL	150
Endive	PL	80	PL	150										
Épinard	PL	150	PL	185	PL	220	PL	150	PI	2*R+30			PL	250
Fenouil	PL	130	PL	180			PL	130	PI	2*R+120	PI	3*R+60	PL	150
Fraise serre remontante	PL	120	PL	250	PL	250	PL	250	PI	4.5*R	PL	250		
Haricot (vert, beurre)	PL	80	PL	180	PL	100	PL	80			PL	120	PL	160
Laitue	PL	120	PL	150	PL	120	PL	120	PL	110	PI	1.7*R+3	PL	120
Mâche	PL	50	PL		PL	70	PL	70					PL	120
Melon plein champ	PL	120	PL	180					PI	4*R+20	PI	4*R-20		
Navet	PL	20	PL	120	PL	120	PL	80	PI	2*R+20	PL	100	PL	120
Oignon	BA		PL	185	PL	150	PL	213			PI	1.5*R+15	PL	150
Pastèque	PL	210					PL	85	PI	8*R+10				
Pomme de terre primeur			BA		PL	200	PL	200	PI	4*R	PI	2.5*R+50	PL	175
Persil			PL	210	PL	100	PL	200	PI	6*R-50			PL	150
Petit pois	PL	50	PL	50	PL	50							PL	30
Poireau	PL	200	PL	250	PL	250	PL	200	PI	3.2*R	PI	3.2*R+2	PL	285
Poivron	PL	700	PL	180	PL	300	PL	300	PI	1.25*R+125	PI	2*R+20	PL	210
Potiron/Courge	PL	100	PL	180										
Radis	PL	100	PL	120	PL	60	PL	100	PL	60	PI	3*R	PL	110
Tomate abri (1)	PL	700			PL	500	PL	750	PI	2*R-100	PI	2*R	PL	320
Tomate industrie					PL	160		150	PI	1.5*R	PI			
Tomate plein champ	PL	250	PL	150	PL	160	PL	400	PI	2*R	PI	2*R	PL	150

BA : bilan prévisionnel d'azote ; BS : bilan simplifié ; PL : dose plafond ; PI : dose pivot

(1) Selon les cas il peut s'agir de tomate d'abri froid ou de tomate en culture hors sol chauffée.

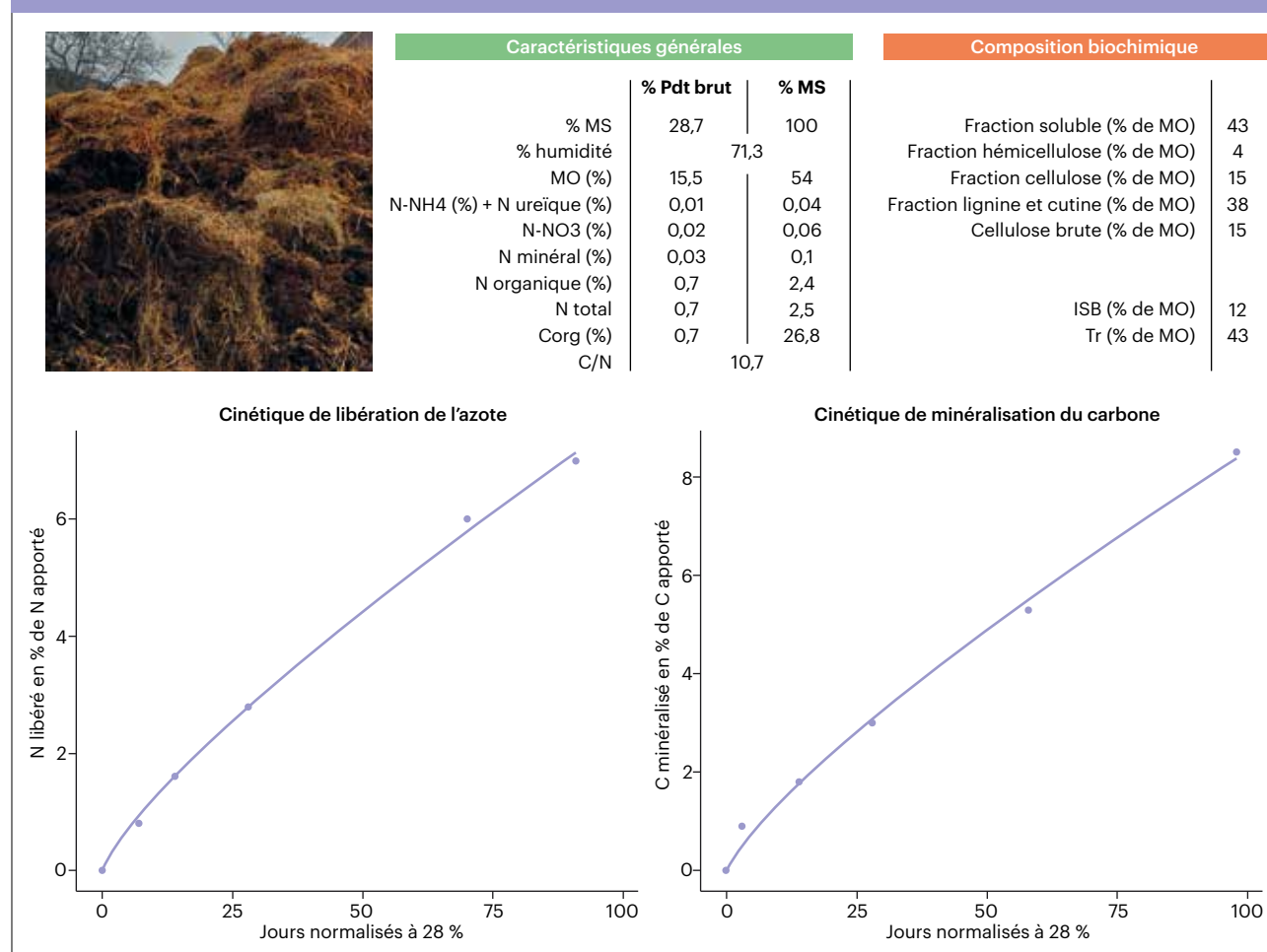
MODÉLISATION DES FLUX D'AZOTE DANS LES PARCELLES ET OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION

La complexité du cycle biogéochimique de l'azote et les évolutions temporelles très rapides des processus sous l'influence des conditions du milieu rendent difficile la mise à disposition d'outils de gestion des flux sur la base de l'ensemble des processus en jeu (Figure 1). La mesure des fuites d'azote, par lixiviation ou pertes gazeuses, est actuellement hors de portée dans un contexte

de production et reste réservée aux approches scientifiques expérimentales. Dans ce cadre, la modélisation apparaît comme une démarche importante. Au sens large, la modélisation peut prendre des formes extrêmement variées, répondant à différents types d'objectifs. Les modèles les plus fondamentaux, utiles à une meilleure compréhension et description des processus, peuvent

souvent être restreints à un groupe de mécanismes physiques, chimiques ou biologiques avec des interactions limitées entre ceux-ci [107]. Une modélisation complète du cycle de l'azote demanderait une représentation dans l'espace qui prendrait en compte une longue liste de facteurs. Les cycles du carbone et de l'azote étant intriqués, dans le sol comme dans les plantes, une

FIGURE 1 : Base de données AZOPRO, des informations sur la minéralisation des matières organiques fertilisantes

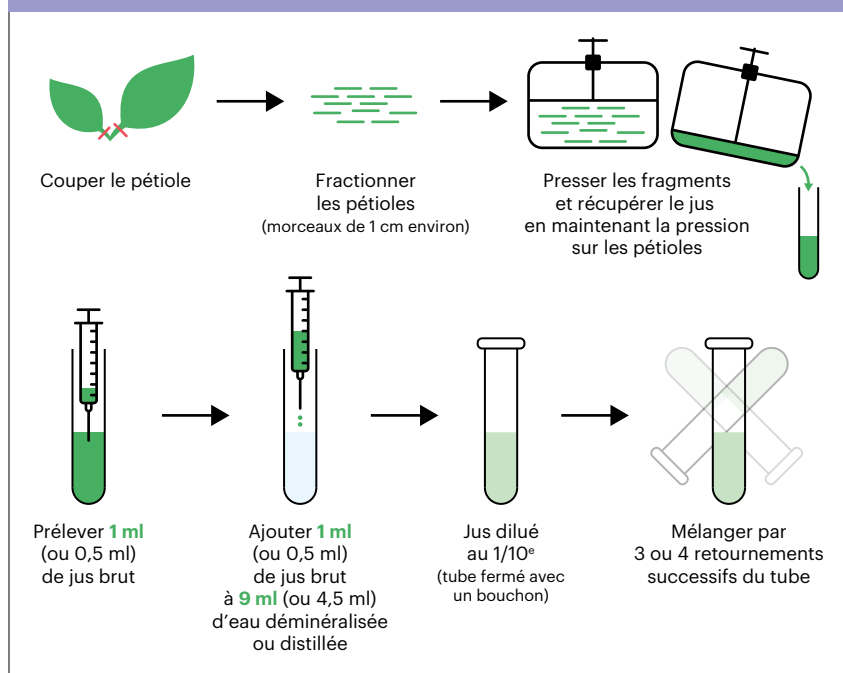


Afin d'augmenter l'efficacité d'utilisation des produits organiques fertilisants, il est primordial de connaître leur capacité à libérer leur composant nutritif pour anticiper leur apport en fonction des besoins de la culture. La base de données AZOPRO répertorie plus d'une soixantaine de produits fertilisants organiques et propose pour chacun d'entre eux, leur composition ainsi que leurs cinétiques de libération de l'azote et du carbone. Les données présentées ci-dessus concernent du fumier de bovin composté.

approche par modélisation du bilan azoté repose sur une description explicite des processus d'acquisition, de transfert et de transformation du carbone. Le plus souvent, les mécanismes sont simplifiés voire négligés s'ils sont quantitativement insignifiants. Les mouvements de solutés varient beaucoup en fonction de la texture du sol et de ses propriétés hydrodynamiques, c'est pourquoi un calcul rigoureux des flux en irrigation/fertirrigation localisée repose sur l'équation de Richard et de convection-dispersion qui tient compte explicitement de ces propriétés hydrodynamiques. Concernant les cultures légumières, les travaux les plus significatifs en France utilisant ces principes mécanistes ont porté sur la modélisation des flux couplés d'eau et de solutés dans les cultures irriguées de laitue [24, 46]. Depuis le début des années 2000, des modélisations en deux dimensions des flux d'eau et de solutés ont été proposées pour plusieurs cultures légumières sur la base du modèle Hydrus 2D [2, 28, 38, 62, 85]. Ce modèle a été beaucoup utilisé pour simuler l'effet de la disposition physique du système d'irrigation et les stratégies de fertirrigation sur les fuites d'azote par lixiviation. Cependant il n'est pas adapté à la modélisation des bilans azotés dans la mesure où il ne dispose pas d'un module de transformation du carbone organique. Par ailleurs, en conditions limitantes d'azote ou d'eau, une simulation réaliste des flux d'azote dans le sol, même avec des équations décrivant les processus physiques, suppose que le module plante puisse représenter les conséquences des stress sur le flux de transpiration, d'absorption d'éléments minéraux ou d'adaptation de la taille du système racinaire [28].

Les modèles de culture comme EPIC [108], STICS [14] ou DSSAT [43] sont généralement moins mécanistes dans leurs formalismes. En particulier, les flux d'eau et de solutés sont calculés à partir de couches de sols superposées et fonctionnant comme des réservoirs, selon l'approche dite capacitive. Les modules de culture sont plus élaborés que dans les modèles centrés sur les processus du sol et ils sont désormais capables de simuler des bilans sur de longues périodes intégrant les successions de cultures et d'intercultures, en

FIGURE 2 : Mesure de l'état azote du couvert par la méthode PILazo



L'échantillonnage se réalise sur jeunes feuilles adultes durant la première moitié de la matinée. Le schéma ci-dessus représente le protocole de préparation de l'échantillon qui sera par la suite analysé avec l'appareil Nitrachek®.

intégrant les choix de gestion des agrosystèmes. Destinés principalement aux grandes cultures, ils ont fait l'objet de peu de développement pour les cultures légumières, à l'exception de la tomate (EPIC [21] ; Cropgro [82] ; Cropsyst [65] ; STICS, [104]), de la laitue (EPIC [42] ; Cropsyst [93]) et du chou (Cropsyst [103]). Le raisonnement de la gestion de l'azote à l'échelle du système de culture, au-delà de celui de la fertilisation d'une culture particulière, est important, car les pertes environnementales peuvent être différées dans le temps. L'outil Syst'N [70] a été conçu spécialement dans cet objectif. Le modèle se compose de modules représentant les grands types de transformation et de transfert de l'azote. Initialement développé pour les grandes cultures, il est en cours d'adaptation pour les cultures légumières de plein champ du nord de la France. Un autre modèle, EU-Rotate_N, spécifiquement destiné aux rotations légumières, a été développé ces dernières années [40, 75]. Il a été testé dans différentes situations de production légumière en Europe et en Chine [92, 93, 94]. Ce modèle a la particularité de calculer la croissance journalière des cultures

à partir d'un paramètre de forçage qui fixe la biomasse accumulée à la fin de la culture, sans que celle-ci soit calculée, comme cela est généralement le cas dans les modèles de culture.

Les modèles de culture permettent, dans la mesure où leur domaine de validité a été correctement évalué, de tester des scénarios de conduite, à l'échelle de la culture ou de la rotation et de les comparer aux pratiques courantes, généralement à des fins d'évaluation des stratégies. Le nombre de paramètres à renseigner est élevé et certains de ces paramètres ne sont pas directement accessibles à la mesure. Ainsi, leur usage demande un niveau d'expertise élevé, qui restreint leur diffusion directe aux exploitations. Les limitations qui s'appliquent au calcul d'un bilan compartimenté monodimensionnel (voir paragraphe B2) se retrouvent lorsque ces principes sont appliqués dans des modèles à réservoir, implicitement monodimensionnels. Il est alors nécessaire pour modéliser des cultures en irrigation/fertirrigation localisée [par ex. 36] d'utiliser un ou des coefficients « d'efficacité » de l'azote minéral en paramètre de forçage, pour représenter

TABLEAU 1 : TOMATE EN SOL - GRILLE DE PILOTAGE PILAZO®

NO ₃ en mg/l																				
> 6 500																				
6 000 à 6 500																				
5 500 à 6 000																				
5 000 à 5 500																				
4 500 à 5 000																				
4 000 à 4 500																				
3 500 à 4 000																				
3 000 à 3 500																				
2 500 à 3 000																				
2 000 à 2 500																				
1 500 à 2 000																				
1 000 à 1 500																				
500 à 1 000																				
< 500																				
Stades repères	F1/F2	F2/F3	N1/N2	N3	N3/N4	N4/N5	R1	R2												
Récolte brute (kg/m²)									3	7	12				14				17	

Fertilisation : à commencer dès la 3^e semaine après la plantation

Début de récolte : environ 500 ° jour (base : 10,5 °C à partir de la plantation)

Stades repères : Fn = floraison n^{ième} bouquet ; Nn = nouaison n^{ième} bouquet ; Rn = récolte n^{ième} bouquet

■ Azote en excédent ; ■ Suffisant : ne pas fertiliser mais suivre de près ; ■ 5 à 10 kg N/ha/semaine ; ■ 10 à 20 kg N/ha/semaine ;

■ 20 à 30 kg N/ha/semaine

Attention : arrêt de la fertilisation 2 à 3 semaines avant la fin de la culture

les mouvements de l'azote dans l'espace du sol. Le manque de robustesse de ce type d'approche peut limiter l'utilité pratique de ces modèles, l'utilisateur devant définir a priori une efficacité qui résulte des flux multidimensionnels, très dépendants du contexte. Dans des systèmes de production non légumiers fortement structurés spatialement, comme en agroforesterie, il a été proposé une amélioration du formalisme « réservoir » en décomposant la surface du sol en cellules adjacentes indépendantes dans lesquelles sont calculées les transformations biologiques et les flux verticaux d'eau et de solutés, sans échanges horizontaux entre les compartiments [32]. Une approche similaire de décomposition de cellules suivant deux dimensions a été proposée dans le modèle EU-rotateN [75]. Dans ce cas, les flux d'infiltration et de drainage sont monodimensionnels et verticaux mais des mouvements capillaires sont possibles dans les deux dimensions, en fonction de la diffusivité de l'eau et de la teneur en eau des cellules [28].

Les outils d'aide à la décision forment une autre catégorie de modèles, destinés quant à eux aux acteurs de la production. Beaucoup d'outils d'aide à la décision modernes sont construits autour d'interfaces informatiques permettant un accès en ligne via un ordinateur ou des téléphones portables. Un inventaire récent des outils d'aide à la décision destinés à la fertilisation des cultures légumières a été proposé [97]. La plupart des outils ont une dimension régionale ou nationale, afin d'être adaptés aux productions locales. Leur vocation est de calculer des besoins en fertilisants azotés et en eau sur des pas de temps courts, parfois en intégrant des données environnementales en temps réel. Certains se rapprochent de modèles de culture, dans des versions simplifiées qui permettent d'estimer, à partir de données climatiques, la dynamique de croissance des cultures, l'évapotranspiration et la demande en azote. C'est par exemple le cas de VegSyst, calibré pour les cultures sous serre plastique du sud-est de l'Espagne [36].

D'autres outils d'aide à la décision sont basés directement sur une mesure du stock d'azote nitrique ou de la concentration en nitrate dans la solution du sol. Ils intègrent parfois des estimations des quantités d'azote minéralisé. Certains se fondent sur les principes de la méthode KNS pour évaluer de manière dynamique la quantité d'azote à rajouter au sol afin de satisfaire la demande des plantes. D'autres outils d'aide à la décision sont basés sur des niveaux recommandés de concentration en azote minéral dans la solution du sol et calculent les quantités à apporter où les modifications de concentration nutritives nécessaires pour aboutir à la concentration voulue dans le sol. Enfin, un dernier type d'outil d'aide à la décision repose sur une évaluation du niveau limitant, ou pas, de la nutrition azotée du peuplement. C'est à ce type d'outil qu'appartient la méthode PILazo®, qui reste le principal outil d'aide à la décision pour la gestion de la fertilisation des légumes en France (Figure 2 et Tableau 1). ■

PERSPECTIVES

L'avancée des connaissances et les très nombreuses observations expérimentales de ces dernières décennies ont contribué à la prise de conscience des risques environnementaux liés à l'introduction toujours plus importante d'azote dans les écosystèmes. Les attentes sociétales, les obligations réglementaires et les incitations économiques convergent pour encourager les agriculteurs à maîtriser les flux d'azote dans leurs systèmes. Des avancées peuvent être observées, avec une tendance à la baisse des apports sous forme minérale et de moins en moins de doses très excédentaires. Cependant le passage d'une logique « assurantielle » basée sur des fertilisations pléthoriques à une stratégie « prudentielle », visant le compromis entre le besoin des cultures et la maîtrise des fuites dans l'environnement, s'opère encore insuffisamment dans les exploitations légumières françaises. Les approches empiriques, guidées par l'expérience, qui reconduisent les doses d'une année sur l'autre, ou bien celles qui reposent sur des grilles fixes de besoins, restent encore assez généralisées. Leur légitimité repose souvent sur des données expérimentales permettant de déterminer des valeurs réalistes. Cependant si ces références donnent effectivement des ordres de grandeur, elles ne remplacent pas les outils de réflexion stratégique ou d'aide à la décision qui sont, comme le rappellent les enquêtes, faiblement mobilisés. En zone vulnérable nitrate, les doses plafond recommandées sur la base de rendements potentiels pour la plupart des espèces légumières et dans la plupart des régions, constituent seulement des « garde-fous » pour limiter les fertilisations excessives. Les disparités interrégionales signalées dans ce document mériteraient d'être corrigées, quand elles ne sont pas basées sur des différences objectivables de rendements et besoins des cultures.

L'absence d'une méthode de référence à l'échelle nationale, du type KNS, empêche probablement une évolution



> ESSAI EN MICROPARCELLES SUR L'UTILISATION DE MATIÈRES ORGANIQUES FERTILISANTES EN MARAÎCHAGE

significative des pratiques, alors que ce type de démarche a fait l'objet de développement dans plusieurs pays européens voisins et montré son efficacité. Faute d'outils correctement calibrés, l'interprétation des analyses d'azote minéral qui sont réalisées à grande échelle, souvent avec le soutien des conseillers techniques et des chambres d'agriculture, reste assez subjective. Ce sont pourtant les mesures de terrain qui permettent d'adapter la stratégie de fertilisation au contexte particulier d'une culture et d'une année. Ainsi, la méthode PILazo® constitue un outil opérationnel intéressant de surveillance du statut des cultures, permettant d'adapter la fertilisation en cours de culture, mais elle concerne un nombre limité d'espèces, pour l'instant. D'autre part, comme cela a été indiqué, le respect d'un statut azoté adéquat (INN = 1) ne garantit pas l'absence de perte d'azote dans l'en-

vironnement, il peut en effet résulter d'une faible efficacité de l'azote apporté, par exemple en cas de surirrigation. Malgré les contraintes que cela impose et parfois la réticence des praticiens à réaliser des prélèvements, le suivi régulier du statut azoté du sol associé à des bases d'interprétation de ce statut azoté serait un bon complément permettant d'aller vers davantage de maîtrise. Cela s'avérera d'autant plus nécessaire que, dans le futur, l'utilisation des fertilisants organiques augmentera et que la dynamique de leur minéralisation nette reste assez difficile à prévoir sur le terrain sans des outils de modélisation d'une certaine complexité. En cultures irriguées, la maîtrise des apports d'azote repose sur la gestion de l'irrigation dans la mesure où l'irrigation peut générer des flux drainants significatifs. Des outils de pilotage existent, fondés sur des capteurs assez simples à mettre en place. Le

développement constant des capteurs et des technologies d'information et de communication (l'Internet des Objets – Internet of Things, IoT) fait que l'usage d'outils de surveillance et le traitement des données qu'ils génèrent sont de plus en plus faciles pour l'utilisateur. À terme, on peut entrevoir le développement d'automates de fertilisation des cultures en sol similaires à ceux du hors-sol, reposant sur une surveillance dynamique de la disponibilité en azote minéral et de l'estimation des besoins d'une culture, en ne recourant plus au choix subjectif d'un praticien. Au-delà de l'azote, c'est l'équilibre global des éléments minéraux et le maintien de la fertilité qui doit être assuré. À ce titre, l'usage très courant d'engrais complets à équilibre Azote/Phosphore/Potassium N : P : K fixes en cultures légumières pourrait être repensé, car le raisonnement des quantités d'engrais apportées est souvent basé sur le calcul de l'azote, faisant fi d'un risque de recharges en phosphore et potassium induits par l'équilibre de l'engrais. A minima, l'utilisation d'une plus large palette d'équilibres, adaptés à l'état chimique du sol, pourrait être recommandée. Les très grandes quantités de phosphore apportées ces dernières décennies dans la plupart des sols légumiers aboutissent à des situations fréquentes où aucun apport de phosphore ne devrait être réalisé, conduisant à proscrire l'usage des engrais complets. L'adaptation spatiale des doses d'en-



> UNE FERTILISATION AZOTÉE EXCESSIVE FAVORISE LES MALADIES, COMME ICI L'OÏDIUM DU FRAISIER

grais pourrait également être davantage explorée, en s'inspirant des méthodes d'agriculture de précision (télédétection, cartographie de rendements potentiels) utilisés en grandes cultures. Ces méthodes sont toutefois davantage destinées aux cultures légumières de plein champ, le maraîchage sous-abri devant plutôt recourir à des capteurs proximaux.

L'impact des apports exogènes d'azote organique ou minéral sur la composition et le fonctionnement du microbiome (i.e.

la microflore dans son intégralité) commence à être décrypté [35]. À mesure que les traits fonctionnels des communautés microbiennes du sol seront mieux compris, la fertilisation azotée, actuellement vue comme une opération de transfert d'azote vers les plantes, pourrait devenir une opération de stimulation du fonctionnement global de la rhizosphère. L'enjeu serait non seulement de maîtriser les transformations et les flux d'azote afin d'élaborer la croissance et la qualité des produits souhaités, mais aussi de contribuer à la santé des plantes via une maîtrise des communautés du sol, y compris les organismes pathogènes et symbiotiques. De plus, l'azote absorbé par la plante participe au compromis de régulation des métabolismes primaires et secondaires du végétal et à l'adaptation des défenses naturelles en réponse à des attaques de pathogènes ou de ravageurs. L'utilisation tactique de la fertilisation à des fins de gestion intégrée de la santé des plantes prendra probablement davantage d'importance à l'avenir, si le recours aux pesticides n'est plus accepté dans les pratiques agricoles. ■

INFOS-CTIFL est édité par le CTIFL (Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes créé par arrêté du 24 septembre 1952 de la loi du 22 juillet 1948)

Adresse : 97 boulevard Pereire, 75017 Paris
Tél. 01 87 76 04 00

Site internet : www.ctifl.fr

Directeur de la publication : Louis Orenge

Rédacteur en chef : Coline Giguët

email : coline.giguët@ctifl.fr

Comité de rédaction : Anne-Laure Levat, Bethsabée Gleizer, Catherine Lagrue, Yann Bintein, Marc Delporte, Philippe Husson, Jean-Marc Goachet

Mise en page : Frédéric Bourcet

Responsable des abonnements : Véronique Bara

email : abonnement@ctifl.fr

Abonnements : Prix 2021 pour 10 numéros/an :

France - 94 € - Étranger - 141 € ; Prix du numéro 13 €

N° de commission paritaire en cours : Dépôt légal à parution - ISSN 0758-5373

Impression : Chirat - 744 rue de Sainte Colombe, 42540 Saint-Just-La-Pendue

Photos de couverture : CTIFL

Reproduction partielle ou intégrale autorisée sous réserve de mentionner la source.

Les données à caractère personnel recueillies sont destinées au CTIFL qui, à défaut d'opposition de votre part, est autorisé à les conserver en mémoire informatique et à les utiliser à des fins de statistiques et d'information en version anonyme. Les informations personnelles collectées sont confidentielles et ne sont en aucun cas confiées à des tiers.

Conformément à la loi 78-17 du 6 janvier 1978 (modifiée par la loi 2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel) relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés, ce traitement est inscrit au registre des traitements du CTIFL. D'après ce même texte, vous disposez d'un droit d'accès, de modification et de rectification et de suppression des données qui vous concernent. Vous pouvez exercer ce droit en adressant, sur justificatif de votre identité, votre demande au délégué à la protection des données du CTIFL, par courrier postal au 97 boulevard Pereire 75017 Paris, ou électronique à dpd@ctifl.fr.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Aguilera, E., Lassaletta, L., Sanz-Cobena, A., Garnier, J., Vallejo, A. (2013). The potential of organic fertilizers and water management to reduce N₂O emissions in Mediterranean climate cropping systems. A review. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 164: 32-52.
- [2] Ajdary, K., Singh, D.K., Singh, A.K., Khanna, M. (2007). Modelling of nitrogen leaching from experimental onion field under drip fertigation. *Agricultural Water Management*, 89: 15-28.
- [3] Akiyama, H., Tsuruta, H. (2003). Effect of organic matter application on N₂O, NO, and NO₂ fluxes from an andisol field. *Global Biogeochemical Cycles*, 17.
- [4] Allaire-Leung, S.E., Wu, L., Mitchell, J.P., Sanden, B.L. (2001). Nitrate leaching and soil nitrate content as affected by irrigation uniformity in a carrot field. *Agricultural Water Management*, 48: 37-50.
- [5] Andrea, O., Catia, B., Paolo, B., Marcello, G., Francesco, T. (2009). Is Cropsyst adequate for management-oriented simulation of growth and yield of processing tomato? *Journal of Applied Horticulture*, 11: 17-22.
- [6] Attard, E., Recous, S., Chabbi, A., De Berranger, C., Guillaumaud, N., Labreuche, J., Philippot, L., Schmid, B., Le Roux, X. (2011). Soil environmental conditions rather than denitrifier abundance and diversity drive potential denitrification after changes in land uses. *Global Change Biology*, 17: 1975-1989.
- [7] Baggs, E.M. (2011). Soil microbial sources of nitrous oxide: Recent advances in knowledge, emerging challenges and future direction. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3: 321-327.
- [8] Bai, M., Suter, H., Lam, S.K., Davies, R., Flesch, T.K., Chen, D.L. (2018). Gaseous emissions from an intensive vegetable farm measured with slant-path FTIR technique. *Agricultural and Forest Meteorology*, 258: 50-55.
- [9] Bar-Yosef, B. (1999). Advances in fertigation. *Advances in Agronomy*, 65: 1-77.
- [10] Bergstrom, L., Brink, N. (1986). Effects of differentiated applications of fertilizer N on leaching losses and distribution of inorganic N in the soil. *Plant and Soil*, 93: 333-345.
- [11] Bertuzzi, P., Raynal-Lacroix, C., Gay, F., Cockborne, A.D., Abarza, E., Bressoud, F., Dumoulin, J., Mounier, A. (2002). Culture d'une salade sous abri: Savoir évaluer la minéralisation nette de l'azote au champ. *Infos-Ctifl*, 183: 40-45.
- [12] Bonanomi, G., D'ascoli, R., Scotti, R., Gaglione, S.A., Caceres, M.G., Sultana, S., Scelza, R., Rao, M.A., Zoina, A. (2014). Soil quality recovery and crop yield enhancement by combined application of compost and wood to vegetables grown under plastic tunnels. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 192: 1-7.
- [13] Brandsaeter, L.O., Heggen, H., Riley, H., Stubhaug, E., Henriksen, T.M. (2008). Winter survival, biomass accumulation and N mineralization of winter annual and biennial legumes sown at various times of year in northern temperate regions. *European Journal of Agronomy*, 28: 437-448.
- [14] Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoulaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.-M., Meynard, J.-M., Delecolle, R. (1998). Stics : A generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. 1. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18: 311-346.
- [15] Bulluck, L.R., Brosius, M., Evanylo, G.K., Ristaino, J.B. (2002). Organic and synthetic fertility amendments influence soil microbial, physical and chemical properties on organic and conventional farms. *Applied Soil Ecology*, 19: 147-160.
- [16] Burns, I.G. (1992). Influence of plant nutrient concentration on growth-rate - use of a nutrient interruption technique to determine critical concentrations of N, P and K in young plants. *Plant and Soil*, 142: 221-233.
- [17] Cahn, M.D., Johnson, L.F. (2017). New approaches to irrigation scheduling of vegetables. *Horticulturae*, 3.
- [18] Cameron, K.C., Di, H.J., Moir, J.L. (2013). Nitrogen losses from the soil/plant system: A review. *Annals of Applied Biology*, 162: 145-173.
- [19] Cardenas-Navarro, R., Adamowicz, S., Robin, P. (1999). Nitrate accumulation in plants: A role for water. *Journal of Experimental Botany*, 50: 613-624.
- [20] Castellanos, M.T., Cartagena, M.C., Ribas, F., Cabello, M.J., Arce, A., Tarquis, A.M. (2013). Impact of nitrogen uptake on field water balance in fertirrigated melon. *Agricultural Water Management*, 120: 56-63.
- [21] Caverio, J., Plant, R.E., Shennan, C., Williams, J.R., Kiniry, J.R., Benson, V.W. (1998). Application of EPIC model to nitrogen cycling in irrigated processing tomatoes under different management systems. *Agricultural Systems*, 56: 391-414.
- [22] Cogger, C.G., Bary, A.I., Myhre, E.A., Fortuna, A.-M., Collins, D.P. (2016). Soil physical properties, nitrogen, and crop yield in organic vegetable production systems. *Agronomy Journal*, 108: 1142-1154.
- [23] Colla, G., Suarez, C.M.C., Cardarelli, M., Rouphael, Y. (2010). Improving nitrogen use efficiency in melon by grafting. *Hortscience*, 45: 559-565.
- [24] De Tourdonnet, S., Meynard, J.M., Lafolie, F., Roger-Estrade, J., Lagier, J., Sebillotte, M. (2001). Non-uniformity of environmental conditions in greenhouse lettuce production increases the risk of N pollution and lower product quality. *Agronomie*, 21: 297-309.
- [25] De Neve, S., Hofman, G. (1996). Modelling N mineralization of vegetable crop residues during laboratory incubations. *Soil Biology & Biochemistry*, 28: 1451-1457.
- [26] Deng, J., Zhou, Z.X., Zheng, X.H., Liu, C.Y., Yao, Z.S., Xie, B.H., Cui, F., Han, S.H., Zhu, J.G. (2012). Annual emissions of nitrous oxide and nitric oxide from rice-wheat rotation and vegetable fields: A case study in the Tai-lake region, China. *Plant and Soil*, 360: 37-53.
- [27] Di, H.J., Cameron, K.C. (2002). Nitrate leaching in temperate agroecosystems: Sources, factors and mitigating strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 64: 237-256.
- [28] Doltra, J., Munoz, P. (2010). Simulation of nitrogen leaching from a fertigated crop rotation in a mediterranean climate using the EU-rotate_N and hydrus-2D models. *Agricultural Water Management*, 97: 277-285.
- [29] Drinkwater, L.E., Letourneau, D.K., Workneh, F., Vanbruggen, A.H.C., Shennan, C. (1995). Fundamental differences between conventional and organic tomato agroecosystems in California. *Ecological Applications*, 5: 1098-1112.
- [30] Dukes, M.D., Zotarelli, L., Morgan, K.T. (2010). Use of irrigation technologies for vegetable crops in Florida. *Horttechnology*, 20: 133-142.
- [31] Dumoulin, J., Le Bot, J. (2001). Nutrition du melon. Une méthode pour gérer au mieux la fertilisation azotée. *PHM Revue Horticole*: 17-22.
- [32] Dupraz, C., Wolz, K.J., Lecomte, I., Talbot, G., Vincent, G., Mulia, R., Bussiere, F., Ozier-Lafontaine, H., Andrianarisoa, S., Jackson, N., Lawson, G., Dones, N., Sinoquet, H., Lusiana, B., Harja, D., Domenicano, S., Reyes, F., Gosme, M., Van Noordwijk, M. (2019). Hi-safe: A 3D agroforestry model for integrating dynamic tree-crop interactions. *Sustainability*, 11.
- [33] Farneselli, M., Benincasa, P., Tosti, G., Simonne, E., Guiducci, M., Tei, F. (2015). High fertigation frequency improves nitrogen uptake and crop performance in processing tomato grown with high nitrogen and water supply. *Agricultural Water Management*, 154: 52-58.
- [34] Feller, C., Fink, M. (2002). Nmin target values for field vegetables. *Acta Horticulturae*, 571: 195-201.
- [35] Francioli, D., Schulz, E., Lentendu, G., Wubet, T., Buscot, F., Reitz, T. 2016. Mineral vs. Organic amendments: Microbial community structure, activity and abundance of agriculturally relevant microbes are driven by long-term fertilization strategies. *Frontiers in Microbiology*, 7.
- [36] Gallardo, M., Thompson, R.B., Gimenez, C., Padilla, F.M., Stoeckle, C.O. (2014). Prototype decision support system based on the Vegsyst simulation model to calculate crop N and water requirements for tomato under plastic cover. *Irrigation Science*, 32: 237-253.
- [37] Gallardo, M., Thompson, R.B., Rodriguez, J.S., Rodriguez, F., Fernandez, M.D., Sanchez, J.A., Magan, J.J. (2009). Simulation of transpiration, drainage, N uptake, nitrate leaching, and n uptake concentration in tomato grown in open substrate. *Agricultural Water Management*, 96: 1773-1784.
- [38] Gardenas, A.I., Hopmans, J.W., Hanson, B.R., Simunek, J. (2005). Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agricultural Water Management*, 74: 219-242.
- [39] Gaskell, M., Smith, R. (2007). Nitrogen sources for organic vegetable crops. *Horttechnology*, 17: 431-441.

BIBLIOGRAPHIE

- [40] Greenwood, D.J. (2001). Modelling N-response of field vegetable crops grown under diverse conditions with N₂O: A review. *Journal of Plant Nutrition*, 24: 1799-1815.
- [41] Guimera, J., Marfa, O., Candela, L., Serrano, L. (1995). Nitrate leaching and strawberry production under drip irrigation management. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 56: 121-135.
- [42] Jackson, L.E., Stivers, L.J., Warden, B.T., Tanji, K.K. (1994). Crop nitrogen utilization and soil nitrate loss in a lettuce field. *Fertilizer Research*, 37: 93-105.
- [43] Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18: 235-265.
- [44] Justes, E., Mary, B., Meynard, J.M., Machet, J.M., Thelierhuche, L. (1994). Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter-wheat crops. *Annals of Botany*, 74: 397-407.
- [45] Krapp, A. (2015). Plant nitrogen assimilation and its regulation: A complex puzzle with missing pieces. *Current Opinion in Plant Biology*, 25: 115-122.
- [46] Lafolie, F., Bruckler, L., Cockborne, A.M.D., Laboucarie, C. (1997). Modelling the water transport and nitrogen dynamics in irrigated salad crops. *Irrigation Science*, 17: 95-104.
- [47] Le Bot, J., Jeannequin, B., Fabre, R. (2001). Growth and nitrogen status of soilless tomato plants following nitrate withdrawal from the nutrient solution. *Annals of Botany*, 88: 361-370.
- [48] Lecompte, F. (2012). Management of soil nitrate heterogeneity resulting from crop rows in a lettuce-tomato rotation under a greenhouse. *Agronomy for Sustainable Development*, 32: 811-819.
- [49] Lecompte, F., Bressoud, F., Pares, L., De Bruyne, F. (2008). Root and nitrate distribution as related to the critical plant N status of a fertigated tomato crop. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 83: 223-231.
- [50] Lecompte, F., Leblond, S. (2006). Impact of burying a sorghum crop on nitrogen balance. *PHM Revue Horticole*: 18-22.
- [51] Leenhardt, D., Lafolie, F., Bruckler, L., Cockborne, A.M.D. (1998). Evaluating irrigation strategies for lettuce by simulation: 2. Nitrogen budget. *European Journal of Agronomy*, 8: 267-282.
- [52] Lemaire, G., Jeuffroy, M.H., Gastal, F. (2008). Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy*, 28: 614-624.
- [53] Li, D. (2013). Emissions of NO and NH₃ from a typical vegetable-land soil after the application of chemical N fertilizers in the pearl river delta. *Plos One*, 8.
- [54] Liao, W., Wang, S., Liu, C., Gao, Z., Flesch, T.K. (2019). Measuring ammonia emissions from vegetable greenhouses with an inverse dispersion technique. *Agricultural and Forest Meteorology*, 278.
- [55] Liu, S., Lin, F., Wu, S., Ji, C., Sun, Y., Jin, Y., Li, S., Li, Z., Zou, J. (2017). A meta-analysis of fertilizer-induced soil NO and combined NO + N₂O emissions. *Global Change Biology*, 23: 2520-2532.
- [56] Maltais-Landry, G., Nesic, Z., Grant, N., Godinez, M., Thompson, B., Hsu, L.-Y., Smukler, S.M. (2019). Quantifying trade-offs among on-farm and off-farm fertility sources to make vegetable organic farming systems more sustainable. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 286.
- [57] Manzoni, S., Porporato, A. (2009). Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales. *Soil Biology & Biochemistry*, 41: 1355-1379.
- [58] Mei, B.L., Zheng, X.H., Xie, B.H., Dong, H.B., Zhou, Z.X., Wang, R., Deng, J., Cui, F., Tong, H.J., Zhu, J. (2009). Nitric oxide emissions from conventional vegetable fields in southeastern China. *Atmospheric Environment*, 43: 2762-2769.
- [59] Min, J., Zhao, X., Shi, W.-M., Xing, G.-X., Zhu, Z.-L. (2011). Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in southeastern China. *Pedosphere*, 21: 464-472.
- [60] Morgan, K.T., Cushman, K.E., Sato, S. (2009). Release mechanisms for slow- and controlled-release fertilizers and strategies for their use in vegetable production. *Horttechnology*, 19: 10-12.
- [61] Morra, L., Pagano, L., Iovieno, P., Baldantoni, D., Alfani, A. (2010). Soil and vegetable crop response to addition of different levels of municipal waste compost under Mediterranean greenhouse conditions. *Agronomy for Sustainable Development*, 30: 701-709.
- [62] Mueller, T., Bouleau, C.R., Perona, P. (2016). Optimizing drip irrigation for eggplant crops in semi-arid zones using evolving thresholds. *Agricultural Water Management*, 177: 54-65.
- [63] 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. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 92: 225-236.
- [64] Nicolardot, B., Recous, S., Mary, B. (2001). Simulation of C and N mineralization during crop residue decomposition: A simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. *Plant and Soil*, 228: 83-103.
- [65] Onofri, A., Beccafichi, C., Benincasa, P., Guiducci, M., Tei, F. (2009). Is cropsyst adequate for management-oriented simulation of growth and yield of processing tomato? *Journal of Applied Horticulture*, 1: 17-22.
- [66] Padilla, F.M., De Souza, R., Teresa Pena-Fleitas, M., Gallardo, M., Gimenez, C., Thompson, R.B. (2018). Different responses of various chlorophyll meters to increasing nitrogen supply in sweet pepper. *Frontiers in Plant Science*, 9.
- [67] Padilla, F.M., Gallardo, M., Manzano-Agugliaro, F. (2018). Global trends in nitrate leaching research in the 1960-2017 period. *Science of the Total Environment*, 643: 400-413.
- [68] Padilla, F.M., Gallardo, M., Teresa Pena-Fleitas, M., De Souza, R., Thompson, R.B. (2018). Proximal optical sensors for nitrogen management of vegetable crops: A review. *Sensors*, 18.
- [69] Pang, X., Mu, Y., Lee, X., Fang, S., Yuan, J., Huang, D. (2009). Nitric oxides and nitrous oxide fluxes from typical vegetables cropland in China: Effects of canopy, soil properties and field management. *Atmospheric Environment*, 43: 2571-2578.
- [70] Parnaudeau, V., Reau, R., Dubrulle, P. (2012). Un outil d'évaluation des fuites d'azote vers l'environnement à l'échelle du système de culture: Le logiciel SYST'N. *Innovations Agronomiques*, 21: 59-70.
- [71] Pfab, H., Palmer, I., Buegger, F., Fiedler, S., Mueller, T., Ruser, R. (2011). N₂O fluxes from a haplic Luvisol under intensive production of lettuce and cauliflower as affected by different N-fertilization strategies. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174: 545-553.
- [72] Predotova, M., Gebauer, J., Diogo, R.V.C., Schlecht, E., Buerkert, A. (2010). Emissions of ammonia, nitrous oxide and carbon dioxide from urban gardens in Niamey, Niger. *Field Crops Research*, 115: 1-8.
- [73] Qiao, C., Liu, L., Hu, S., Compton, J.E., Greaver, T.L., Li, Q. (2015). How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input. *Global Change Biology*, 21: 1249-1257.
- [74] Quan, Z., Huang, B., Lu, C., Shi, Y., Cao, Y., Wang, Y., He, C., Chi, G., Ma, J., Chen, X. (2015). Nitrogen accumulation and loss in a high-input greenhouse vegetable cropping system elevated by application of manures. *Hortscience*, 50: 1688-1693.
- [75] Rahn, C.R., Zhang, K., Lillywhite, R., Ramos, C., Doltra, J., De Paz, J.M., Riley, H., Fink, M., Nendel, C., Thorup-Kristensen, K., Pedersen, A., Piro, F., Venezia, A., Firth, C., Schmutz, U., Rayns, F., Strohmeyer, K. (2010). EU-rotate_N - a decision support system - to predict environmental and economic consequences of the management of nitrogen fertilizer in crop rotations. *European Journal of Horticultural Science*, 75: 20-32.
- [76] Ramos, C., Agut, A., Lidon, A.L. (2002). Nitrate leaching in important crops of the valencian community region (Spain). *Environmental Pollution*, 118: 215-223.
- [77] Rashti, M.R., Wang, W.J., Moody, P., Chen, C.R., Ghadiri, H. (2015). Fertiliser-induced nitrous oxide emissions from vegetable production in the world and the regulating factors: A review. *Atmospheric Environment*, 112: 225-233.
- [78] Ravier, C., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M. (2016). Mismatch between a science-based decision tool and its use: The case of the balance-sheet method for nitrogen fertilization in France. *Njas-Wageningen Journal of Life Sciences*, 79: 31-40.
- [79] Raynal-Lacroix, C. (2005). Pilazo: Practical management of nitrogen. Vegetables and strawberry. Paris: Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes. 77 pp.

BIBLIOGRAPHIE

- [80] Ren, T., Christie, P., Wang, J., Chen, Q., Zhang, F. (2010). Root-zone soil nitrogen management to maintain high tomato yields and minimum nitrogen losses to the environment. *Scientia Horticulturae*, 125: 25-33.
- [81] Ricard, S., Lecompte, F. (2015). Pilotage de l'irrigation en cultures légumières : Enquêtes sur les outils et les pratiques. INRA-Ardepi. Rapport au GIS PICleg. <https://www.picleg.fr/Publications/Etudes-et-dossiers-thematiques/Pilotage-de-l-irrigation-en-cultures-legumieres>.
- [82] Rinaldi, M., Ventrella, D., Gagliano, C. (2007). Comparison of nitrogen and irrigation strategies in tomato using CROPGRO model. A case study from southern Italy. *Agricultural Water Management*, 87: 91-105.
- [83] Robertson, G.P., Vitousek, P.M. (2009). Nitrogen in agriculture: Balancing the cost of an essential resource. *Annual Review of Environment and Resources*, 34: 97-125.
- [84] Ryan, M.G., Law, B.E. (2005). Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 73: 3-27.
- [85] Sakaguchi, A., Yanai, Y., Sasaki, H. (2019). Subsurface irrigation system design for vegetable production using Hydrus-2D. *Agricultural Water Management*, 219: 12-18.
- [86] Seiz, P., Guzman-Bustamante, I., Schulz, R., Müller, T., Ruser, R. (2019). Effect of crop residue removal and straw addition on nitrous oxide emissions from a horticulturally used soil in south Germany. *Soil Science Society of America Journal*, 83: 1399-1409.
- [87] Serra-Wittling, C., Molle, B., Cheviron, B. (2019). Plot level assessment of irrigation water savings due to the shift from sprinkler to localized irrigation systems or to the use of soil hydric status probes. Application in the French context. *Agricultural Water Management*, 223.
- [88] Singandhupe, R.B., Rao, G.G.S.N., Patil, N.G., Brahmanand, P.S. (2003). Fertilization studies and irrigation scheduling in drip irrigation system in tomato crop (*Lycopersicon esculentum* L.). *European Journal of Agronomy*, 19: 327-340.
- [89] Sommer, S.G., Hutchings, N.J. (2001). Ammonia emission from field applied manure and its reduction - invited paper. *European Journal of Agronomy*, 15: 1-15.
- [90] Sommer, S.G., Schjoerring, J.K., Denmead, O.T. (2004). Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops, in *Advances in agronomy*, vol 82, Sparks, D.L., Editor. p. 557-622.
- [91] Soto, F., Gallardo, M., Gimenez, C., Pena-Fleitas, T., Thompson, R.B. (2014). Simulation of tomato growth, water and N dynamics using the EU-rotate_N model in Mediterranean greenhouses with drip irrigation and fertigation. *Agricultural Water Management*, 132: 46-59.
- [92] Soto, F., Thompson, R.B., Granados, M.R., Martínez-Gaitan, C., Gallardo, M. (2018). Simulation of agronomic and nitrate pollution related parameters in vegetable cropping sequences in Mediterranean greenhouses using the EU-rotate_N model. *Agricultural Water Management*, 199: 175-189.
- [93] Suarez-Rey, E.M., Romero-Gamez, M., Gimenez, C., Thompson, R.B., Gallardo, M. (2016). Use of EU-rotate_N and CROPSYST models to predict yield, growth and water and N dynamics of fertigated leafy vegetables in a Mediterranean climate and to determine N fertilizer requirements. *Agricultural Systems*, 149: 150-164.
- [94] Sun, Y., Hu, K., Fan, Z., Wei, Y., Lin, S., Wang, J. (2013). Simulating the fate of nitrogen and optimizing water and nitrogen management of greenhouse tomato in north China using the EU-rotate_N model. *Agricultural Water Management*, 128: 72-84.
- [95] Sutton, M.A., Oenema, O., Erisman, J.W., Leip, A., Van Grinsven, H., Winiwarter, W. (2011). Too much of a good thing. *Nature*, 472: 159-161.
- [96] Thompson, R.B., Gallardo, M., Valdez, L.C., Fernandez, M.D. (2007). Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. *Agricultural Water Management*, 88: 147-158.
- [97] Thompson, R.B., Tremblay, N., Fink, M., Gallardo, M., Padilla, F.M. (2017). Tools and strategies for sustainable nitrogen fertilisation of vegetable crops, in *Advances in research on fertilization management of vegetable crops*, Tei, F., Nicola, S., Benincasa, P., Editors. p. 11-63.
- [98] Thomson, A.J., Giannopoulos, G., Pretty, J., Baggs, E.M., Richardson, D.J. (2012). Biological sources and sinks of nitrous oxide and strategies to mitigate emissions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 367: 1157-1168.
- [99] Ti, C., Luo, Y., Yan, X. (2015). Characteristics of nitrogen balance in open-air and greenhouse vegetable cropping systems of China. *Environmental Science and Pollution Research*, 22: 18508-18518.
- [100] Tkacz, A., Poole, P. (2015). Role of root microbiota in plant productivity. *Journal of Experimental Botany*, 66: 2167-2175.
- [101] Topcu, S., Kirda, C., Dasgan, Y., Kaman, H., Cetin, M., Yazici, A., Bacon, M.A. (2007). Yield response and N-fertiliser recovery of tomato grown under deficit irrigation. *European Journal of Agronomy*, 26: 64-70.
- [102] Trinsoutrot, I., Recous, S., Bentz, B., Lineres, M., Cheneby, D., Nicolardot, B. (2000). Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under non-limiting nitrogen conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 918-926.
- [103] Uebelhoefer, A., Munz, S., Graeff-Hoenninger, S., Claupein, W. (2015). Evaluation of the CROPGRO model for white cabbage production under temperate European climate conditions. *Scientia Horticulturae*, 182: 110-118.
- [104] Valdes-Gomez, H., Gary, C., Brisson, N., Matus, F. (2014). Modelling indeterminate development, dry matter partitioning and the effect of nitrogen supply in tomato with the generic STICS crop-soil model. *Scientia Horticulturae*, 175: 44-56.
- [105] Vazquez, N., Pardo, A., Suso, M.L., Quemada, M. (2005). A methodology for measuring drainage and nitrate leaching in unevenly irrigated vegetable crops. *Plant and Soil*, 269: 297-308.
- [106] Vazquez, N., Pardo, A., Suso, M.L., Quemada, M. (2006). Drainage and nitrate leaching under processing tomato growth with drip irrigation and plastic mulching. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112: 313-323.
- [107] Vereecken, H., Schnepf, A., Hopmans, J.W., Javaux, M., Or, D., Roose, T., Vanderborght, J., Young, M.H., Amelung, W., Aitkenhead, M., Allison, S.D., Assouline, S., Baveye, P., Berli, M., Bruggemann, N., Finke, P., Flury, M., Gaiser, T., Govers, G., Ghezzehei, T., Hallett, P., Franssen, H.J.H., Heppell, J., Horn, R., Huisman, J.A., Jacques, D., Jonard, F., Kollet, S., Lafolie, F., Lamorski, K., Leitner, D., Mcbratney, A., Minasny, B., Montzka, C., Nowak, W., Pachepsky, Y., Padarian, J., Romano, N., Roth, K., Rothfuss, Y., Rowe, E.C., Schwen, A., Simunek, J., Tiktak, A., Van Dam, J., Van Der Zee, S.E.a.T.M., Vogel, H.J., Vrugt, J.A., Woehling, T., Young, I.M. (2016). Modeling soil processes: Review, key challenges, and new perspectives. *Vadose Zone Journal*, 15.
- [108] Williams, J.R., Jones, C.A., Kiniry, J.R., Spalton, D.A. (1989). The EPIC crop growth model. *Transactions of the ASAE, American Society of Agricultural Engineers*, 32: 497-511.
- [109] Xu, G., Fan, X., Miller, A.J. (2012). Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *Annual review of plant biology*, 63 (1): 153-182.
- [110] Yuan, B.Z., Kang, Y.H., Nishiyama, S. (2001). Drip irrigation scheduling for tomatoes in unheated greenhouses. *Irrigation Science*, 20: 149-154.
- [111] Zhu, J.H., Li, X.L., Christie, P., Li, J.L. (2005). Environmental implications of low nitrogen use efficiency in excessively fertilized hot pepper (*Capsicum frutescens* L.) cropping systems. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 111: 70-80.
- [112] Ziegler, J., Strohmeyer, K., Brand, T. (1996). Nitrogen supply of vegetables based on the "kns-system". *International Society for Horticultural Science (ISHS)*, Leuven, Belgium.
- [113] Zotarelli, L., Dukes, M.D., Scholberg, J.M., Hanselman, T., Le Femminella, K., Munoz-Carpena, R. (2008). Nitrogen and water use efficiency of zucchini squash for a plastic mulch bed system on a sandy soil. *Scientia Horticulturae*, 116: 8-16.
- [114] Zotarelli, L., Dukes, M.D., Scholberg, J.M.S., Munoz-Carpena, R., Icerman, J. (2009). Tomato nitrogen accumulation and fertilizer use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. *Agricultural Water Management*, 96: 1247-1258.
- [115] Zotarelli, L., Scholberg, J.M., Dukes, M.D., Munoz-Carpena, R. (2007). Monitoring of nitrate leaching in sandy soils: Comparison of three methods. *Journal of Environmental Quality*, 36: 953-962.



Le centre technique au service de toute la filière

> Centre de Balandran

751 chemin de Balandran
30127 Bellegarde
Tél. +33 (0)4 66 01 10 54

> Centre de Carquefou

ZI Belle Étoile - Antarès
35 allée des Sapins
44483 Carquefou
Tél. +33 (0)2 40 50 81 65

> Centre de La Morinière

37800 Saint-Épain
Tél. +33 (0)2 47 73 75 00

> Centre de Lanxade

28 route des Nébouts
24130 Prignonieux
Tél. +33 (0)5 53 58 00 05

> Centre de Saint-Rémy-de-Provence

Route de Mollégès
13210 St-Rémy-de-Provence
Tél. +33 (0)4 90 92 05 82

> Antenne de Rungis

1 rue de Perpignan
Bâtiment D3
Case postale 30420
94632 Rungis Cedex
Tél. +33 (0)1 56 70 11 30

> Antenne de Nancy

20 rue Aristide Briand
54500 Vandœuvre-lès-Nancy
Tél. +33 (0)3 83 56 79 78

> CTIFL Paris

97 boulevard Pereire
75017 Paris
Tél. +33 (0)1 87 76 04 00

Réussir aujourd'hui,
C'est imaginer demain

Action financée par

