



CATE - Station Expérimentale de Vézendoquet - 29250 ST POL DE LEON

## **Maîtriser le lessivage des nitrates en pépinière ornementale hors-sol**

Synthèse des expérimentations réalisées au CATE de 2010 à 2022 et état des connaissances

Laurent MARY – Responsable des expérimentations horticoles

En horticulture ornementale comme dans d'autres secteurs de l'agriculture, la prise en compte des enjeux environnementaux est devenue une préoccupation majeure.

L'objectif des expérimentations réalisées au CATE de 2010 à 2022 visait à acquérir des connaissances permettant de mieux maîtriser les impacts environnementaux des cultures en conteneurs d'arbustes en limitant les conséquences de la fertilisation sur la qualité des eaux tout en conservant un niveau de qualité des végétaux correspondant aux exigences de la distribution (importance de la ramification, compacité, couleur du feuillage) et en assurant la sécurité des itinéraires de culture.

Les exigences de qualité des végétaux pour la commercialisation se sont en effet très nettement accrues depuis une décennie. Or, la fertilisation joue un rôle essentiel sur la qualité des arbustes élevés en conteneurs et a donc de fortes répercussions sur les possibilités de commercialisation des végétaux et sur la rentabilité du système de culture. Le coût des engrais a également fortement augmenté et doit être pris en considération.

### **1. Éléments de contexte**

La réglementation sur les rejets dans les eaux de surface impose que les entreprises soient soumises à déclaration si le flux d'azote total rejeté à l'extérieur de l'exploitation est supérieur à 1,2 kg/jour/site de production et à autorisation si le flux d'azote total rejeté est supérieur à 12 kg/jour (Arrêté du 09/08/2006 du Ministère de l'Ecologie et du développement durable, JO 24/09/2006 15/48 & Code de l'environnement, article R214-1). La filière pépinière comme les autres filières agricoles doit donc s'assurer du respect de ces normes.

Si l'amélioration de l'efficacité de la fertilisation en culture en conteneurs apparaît comme incontournable et est un enjeu très actuel, il s'agit aussi d'accéder à des informations plus complètes sur les risques de lessivage des nitrates et de concevoir un outil de raisonnement et de pilotage de la fertilisation en pépinière hors-sol.

#### **Les spécificités du système de culture en conteneurs :**

Les cultures hors-sols en conteneur sont très différentes des cultures en pleine terre : le volume limité des conteneurs soumet l'enracinement à de fortes variations des paramètres environnementaux (température, humidité, concentration en éléments fertilisants, vie microbienne...). Les flux d'eau et d'éléments fertilisants peuvent être fortement accélérés.

Ces cultures sont réalisées sur des aires spécialisées plus ou moins imperméabilisées, sous abri (généralement non chauffé en pépinière) ou à l'extérieur. Les possibilités de recyclage des eaux utilisées pour l'irrigation sont plus ou moins parfaites et plus ou moins difficiles à mettre en œuvre selon les exploitations, leur topographie, les systèmes de culture. Pour les arbustes, ce sont des cultures plus ou moins longues, d'un an (quelques fois moins) à parfois, plusieurs années.

Par contre, l'utilisation d'engrais à libération programmée s'est généralisée à l'ensemble de la pépinière française et est devenue le système de fertilisation ultra-majoritaire. L'utilisation d'engrais à libération programmée pour la fertilisation des cultures limite en théorie les risques de lessivage des nitrates. Mais en pratique, elle ne les annule pas et ce risque peut même être non négligeable à certaines périodes de l'année en fonction des pratiques mises en œuvre. Les pratiques de fertilisation par ces engrais à libération programmée en pépinière ornementale sont toutefois très diversifiées et ont subi de fortes évolutions depuis une dizaine d'années. Les pratiques de fertilisation ont été modifiées parallèlement aux itinéraires de culture et les engrais ont évolué en allant vers une meilleure maîtrise de leur libération. Ces évolutions ont été synthétisées par L. Mary (2012). En outre, la majorité des programmes de fertilisation associent 2 pratiques : l'incorporation d'une partie de la fertilisation (50 à 70 % de la dose totale) dans le substrat au rempotage et la re-fertilisation en cours de culture par la pose, parfois à plusieurs reprises) de quantités d'engrais définies sur le substrat (surfaçage).

Même s'ils présentent l'avantage de limiter la consommation d'énergie associée à la fabrication des engrais azotés, les engrais organiques sont peu utilisés pour le moment par les producteurs car la maîtrise de la minéralisation est peu évidente dans les conteneurs soumis à des variations brutales et fréquentes des paramètres environnementaux (température, humidité, pH, salinité, aération...). Les références sur les possibilités et les conditions d'utilisations des engrais pour les cultures en conteneurs se sont cependant fortement accrues ces dernières années, notamment pour réaliser des productions de certains arbustes dans le cadre de l'Agriculture Biologique (Cf projet PepAB : <https://www.station-cate.fr/wp-content/uploads/2023/10/projet-pepab-synthese-des-resultats-2020-2023.pdf>)

Par ailleurs, on observe dans ce secteur une très forte diversité des taxons cultivés (plusieurs milliers) et des itinéraires de cultures (durée, période de rempotage, conditions de culture...). De plus, on s'oriente progressivement vers des modifications importantes des itinéraires de culture pour la production d'arbustes. On cherche notamment à raccourcir les cycles de culture pour limiter les coûts de production tout en aboutissant aux mêmes exigences de qualité et de présentation des plantes. Les besoins instantanés des plantes en éléments fertilisants devront alors être mieux pourvus.

Les exigences des différents taxons cultivés en conteneurs sont également assez diversifiées. Certains taxons sont sensibles à des excès de fertilisation et de salinités alors que d'autres sont plus exigeants.

### **Etat des connaissances sur le lessivage des cultures en conteneur**

Le lessivage des nitrates pour les cultures ornementales hors-sol est documenté depuis de nombreuses années dans plusieurs pays (Cabrera & al., 1993; Harris & al., 1997; Matysiak 2016). Yeager et al. (2010) ont synthétisé de nombreux travaux pour établir des bonnes pratiques de conduite en matière de fertilisation et d'irrigation pour les pépinières américaines (qui utilisaient de façon privilégiée de l'irrigation fertilisante). Il a été montré que l'utilisation d'engrais à libération programmée en pépinière hors-sol permettait de diminuer fortement le lessivage des nitrates par rapport à l'utilisation de solution nutritive (Harris & al., 1997 ; Matysiak, 2015; Matysiak, 2016). Il a été observé également que les pratiques de fertilisation, les excès d'eau et la gestion de l'eau jouent un rôle important dans le processus de lessivage (Alam & al., 2009; Billderback, 2002 ; Milion J& al.,2007).

Ces informations sont très utiles. Mais, dans un certain nombre de ces publications, les mesures du lessivage étaient séquentielles et discontinues sur des pas de temps plus ou moins longs ou concernaient des cultures beaucoup plus courtes que celles réalisées en France. De même, les systèmes de fertilisation pouvaient être très différents avec le recours notamment à l'irrigation fertilisante.

Or, pour améliorer l'efficacité de la fertilisation en pépinière hors-sol, une compréhension dynamique du processus de lessivage au niveau du conteneur pendant toute la durée de la culture nous est apparue nécessaire. Pour cela, un système de mesure en continu du drainage a été mis en œuvre dans plusieurs expérimentations réalisées à la station du CATE (Mary, 2014; Mary, 2015 ; Mary, 2016) de façon à avoir accès aux flux d'azote lessivés durant tout le cycle de culture.

Dans un premier temps, ce sont principalement 2 espèces d'arbustes qui ont servi de modèle (*Escalonia iveyi*, *Viburnum tinus*) pour ces essais dans le cadre d'un itinéraire de culture de référence (culture d'un an en conteneur de 4 litres avec rempotage sous abri et sortie au printemps). Les premières données acquises lors de ce projet ont permis d'élaborer un modèle descriptif du fonctionnement du système plantes en conteneurs donnant la possibilité de réfléchir à des leviers pour maîtriser le lessivage des nitrates pour ce système de culture. Différents leviers ont été évalués pour limiter les risques de lessivages et sont présentés dans ce document.

Dans un deuxième temps, les expérimentations ont surtout été orientées vers l'étude des effets de la fertilisation de complément en cours de culture sur le lessivage. Là aussi, des leviers sont proposés pour limiter les risques et d'autres

sont en cours d'évaluation. Les premiers résultats sont cependant présentés. Ces travaux montrent qu'il est nécessaire d'améliorer les connaissances pour piloter de façon plus optimale la fertilisation en cours de culture pour à la fois limiter les impacts environnementaux tout en permettant d'accéder à un haut niveau de qualité des végétaux produits.

La liste des expérimentations réalisées à la station du CATE entre 2010 et 2022 et qui fait l'objet de cette synthèse est présentée en annexe 1.

## 2. Méthode de mesure :

Pour les cultures en conteneurs, les phénomènes de lessivage interviennent sur des pas de temps très courts, de l'ordre de la journée, en liaison notamment avec le fonctionnement hydrique du conteneur.

Des méthodes de mesure du lessivage des nitrates sont recensées par Adiscott (1990) telles que l'utilisation de bougies poreuses ou de systèmes de drainage à grande échelle. Mais, pour les cultures en conteneurs, et en raison des dimensions et du pas de temps autour duquel fonctionne le système, il nous a semblé plus pertinent de récupérer et de mesurer les percolats produits par les conteneurs.

C'est pourquoi nous avons opté pour un procédé de lysimètre qui permet de récupérer en continu les percolats de plusieurs conteneurs tout en écartant les eaux d'irrigation ou la pluie qui tombe à côté des conteneurs de façon à accéder à la composition précise des percolats sans qu'elle soit diluée par de l'eau qui n'aurait pas traversé les conteneurs (Figure n°1). Les analyses des percolats sont réalisées une fois /semaine. Nous avons déjà vérifié qu'il n'y avait pas d'évolution significative de la concentration en nitrates entre des percolats récupérés et analysés toutes les semaines ou tous les jours. Dans nos conditions de réalisation (températures extérieures modérées, récupération des percolats dans des bacs noirs fréquemment nettoyés), les analyses ne sont pas perturbées par des contaminations bactériennes ou d'algues.



Figure 1 : Lysimètre utilisé pour mesurer le lessivage des nitrates des cultures en conteneur.

Procédé adapté à la mesure des percolats pour étudier le lessivage des nitrates. La captation des percolats se fait en continu. L'eau qui tombe à côté des conteneurs est écartée.

Les percolats sont analysés chaque semaine (volume, EC, concentration en nitrates par nitratechek).

Mais :

- Les remontées par capillarité sont empêchées.
- Plantes surélevées du sol → transpiration légèrement différente d'une culture au sol.
- Densité fixe.

La technique de mesure choisie soulève un certain nombre de questions méthodologiques concernant notamment l'échantillonnage et la représentativité des mesures, l'impact du procédé sur les besoins en eau des plantes qui y sont cultivées, la non-prise en compte des remontées capillaires, l'optimisation des irrigations. Mais, il a été estimé que cette méthode permettait d'aboutir à une représentativité acceptable des phénomènes en jeu dans le processus de lessivage.

## 3. Le fonctionnement du système de la plante dans son conteneur et le lessivage des nitrates

La figure n°2 présente le fonctionnement du système de la plante cultivée en conteneur centré sur la question du lessivage. Ce système est basé sur le fonctionnement de 2 sous-systèmes qui interagissent entre eux :

- D'une part : la solution du substrat se charge en éléments fertilisants du fait de la libération d'éléments par les engrais à libération programmée, par la minéralisation d'engrais organiques ou par l'apport de solution nutritive (correspondant à une offre en éléments fertilisants). Parallèlement, la solution du substrat s'appauvrit en éléments fertilisants du fait de l'absorption par la plante, de la fixation d'éléments sur le substrat ou par réorganisation (correspondant à une demande en éléments fertilisants). Cet équilibre détermine la richesse de la solution du substrat en éléments minéraux.

- D'autre part, les apports d'eau à la culture par l'irrigation et la pluie interviennent sur le système ainsi que les caractéristiques hydriques du substrat.

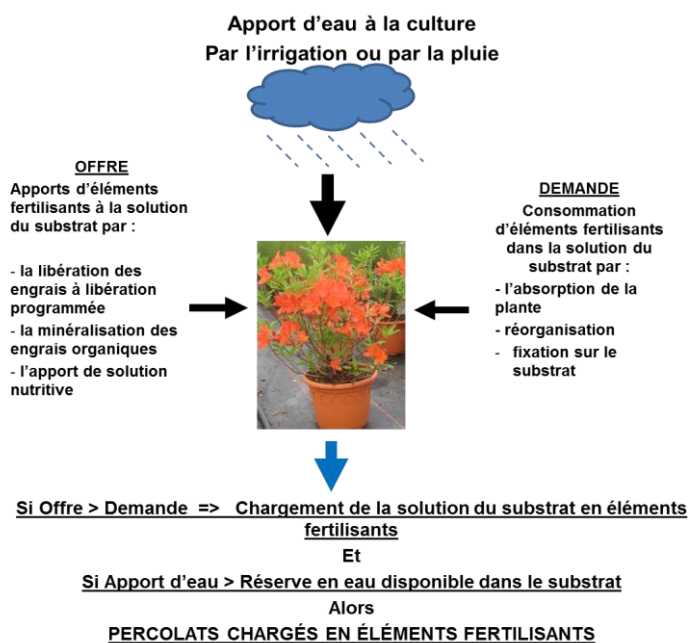


Figure 2 : Modèle empirique du fonctionnement des plantes cultivées en conteneurs par rapport à la problématique du lessivage.

Ainsi, à chaque moment de la culture, si l'offre en éléments fertilisants est supérieure à la demande, la solution du substrat va se charger en éléments fertilisants et si les apports d'eau sont supérieurs aux possibilités de stockage de l'eau dans le substrat, on a alors formation d'un percolat chargé en éléments fertilisants (schéma ci-dessous).

### Le lessivage de nitrates en culture en conteneurs – un phénomène en 3 phases :

Comme le montre la figure n°3, les mesures du lessivage des nitrates réalisées lors des expérimentations réalisées de 2010 à 2012 ont montré qu'au cours d'une culture d'arbustes en conteneurs fertilisée par des engrais à libération programmée, on observait 3 phases successives pour le lessivage des nitrates :

- une période de faible lessivage qui intervient jusqu'à la fin de l'hiver : la culture démarrée sous abri ne subit pas le lessivage dû à la pluie. Les irrigations sont peu nombreuses. La libération des engrais reste modérée. La salinité des percolats n'est cependant pas négligeable mais leur volume est faible.

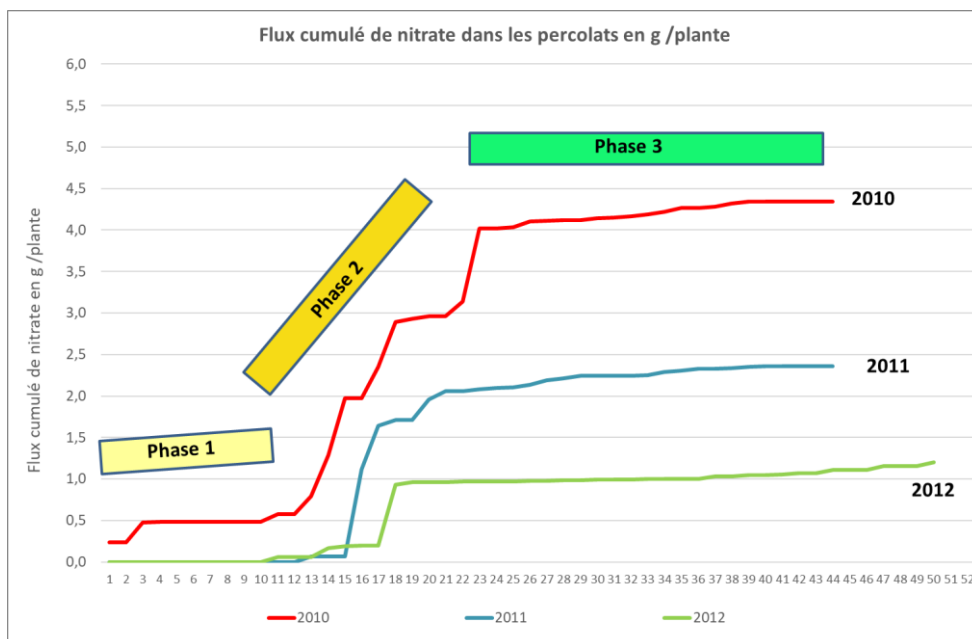


Figure 3 : Lessivage des nitrates mesuré sur une culture d'Escalonia iveyi en C4L. Rempotage d'hiver sous abri, sortie au printemps, fertilisation par engrais à libération programmée au rempotage + surfaçage et irrigation par aspersion. Le lessivage des nitrates est exprimé en flux cumulé de NO<sub>3</sub> (en g de NO<sub>3</sub> /plante /an).

- une période de lessivage plus intense au cours du printemps qui correspond à une période critique, de fin mars à fin juin, liée à l'augmentation de la fréquence des arrosages et aux pluies lorsque les plantes sont placées à l'extérieur. Les besoins minéraux des plantes restent limités du fait de leur croissance encore peu importante.

- une nouvelle phase intervient ensuite à partir de la fin du printemps où le lessivage peut être variable selon les pratiques de re-fertilisation en cours de culture. La demande des plantes en éléments minéraux devient plus importante avec la croissance. Bien que les irrigations soient plus conséquentes et entraînent un fort drainage, le lessivage peut être maîtrisé si la minéralisation ou la libération des éléments fertilisants sont optimisés par rapport aux besoins. Selon le mode de fertilisation de complément (type d'engrais de surfaçage, fractionnement, dose, date), on peut cependant observer de fortes variations du lessivage au cours de cette période.

Ces essais montrent qu'avec l'utilisation des engrais à libération programmée, la proportion de nitrates lessivés par rapport aux apports est relativement faible dans les situations les moins risquées (de l'ordre de 10 %). Cette cinétique peut cependant évoluer plus ou moins selon les années en fonction du climat, de la croissance des végétaux, des programmes de fertilisation mis en œuvre et de différents paramètres culturels. De plus, la mise en œuvre de certaines conduites risquées pour le lessivage, la densité des cultures et la taille des exploitations font que les normes de rejets de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans les eaux de surface peuvent ne pas être respectées.

La cinétique du lessivage des sels minéraux totaux est légèrement différente de celle des nitrates et est plus régulière dans le temps. Cette dernière est très liée à la charge naturelle en éléments minéraux de l'eau d'irrigation (pour 50 % environ) alors que le lessivage des nitrates apparaît plus lié à la fertilisation.

### Effets de différents facteurs de production sur le lessivage des nitrates en conteneurs

Les effets de différents facteurs ont été étudiés au cours de ce programme en vue de limiter le lessivage des nitrates des cultures en conteneurs. Ces facteurs sont notamment :

- Les pratiques de fertilisation : les impacts environnementaux de différents programmes de fertilisation, en fonction des marques d'engrais, des doses utilisées, des durées de libération ont été évalués. Même si nous avons vu que le système avait déjà une efficacité correcte, des différences importantes ont été observées et les programmes de fertilisation mis en œuvre apparaissent comme un moyen important de limiter le lessivage des nitrates. Les avancées les plus notables concernent la partie de la fertilisation incorporée dans le substrat au moment du rempotage. Les effets des re-fertilisations en cours de culture restent moins bien maîtrisés.

La figure n°4 illustre les effets de la fertilisation au rempotage sur le lessivage des nitrates d'une culture d'Escalonia en conteneur de 4 litres.

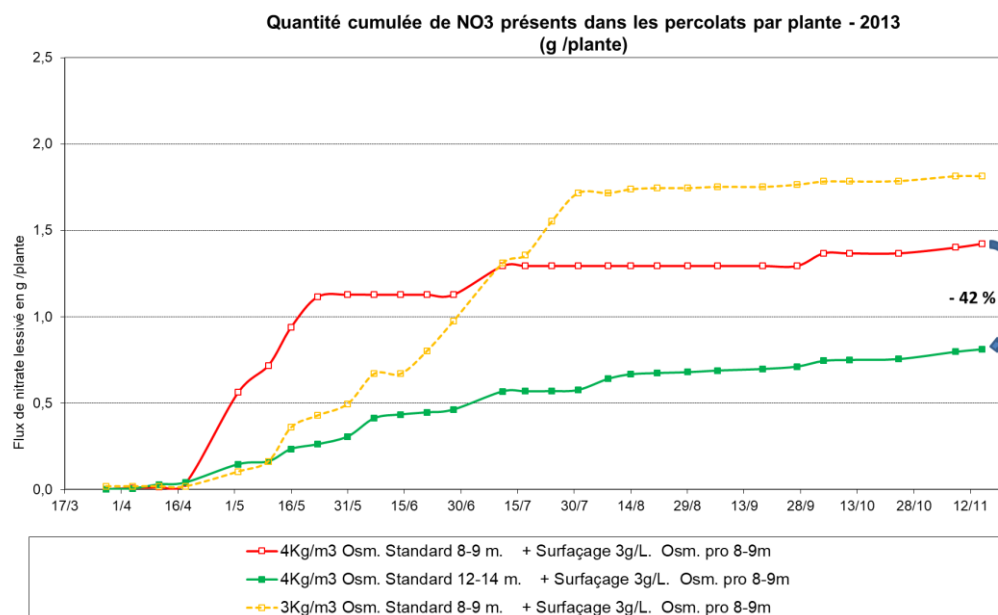


Figure 4 : lessivage des nitrates mesurés sur une culture d'*Escallonia ivelyi* en C4L pour différentes fertilisations au rempotage. Substrat à 60 % de tourbe. Irrigation par aspersion. Rempotage de janvier 2013. Le lessivage des nitrates est exprimé en flux cumulé de NO<sub>3</sub> (en g de NO<sub>3</sub> /plante /an).

Au cours de cette expérimentation, avec l'engrais à libération programmée de 8-9 mois, la libération des éléments fertilisants a été trop rapide par rapport aux possibilités d'absorption de la plante et les éléments minéraux en excès ont été lessivés. La durée de libération de l'engrais 12-14 mois a mieux coïncidé avec les besoins de la culture. La durée de libération de l'engrais incorporé dans le substrat doit être cohérente avec le rythme de croissance des plantes. Une diminution de la dose pour l'engrais 8-9 mois ne résout pas le problème car la plante, moins développée à l'issue du printemps, possède au final une moins bonne capacité à prélever les éléments fertilisants disponibles dans le conteneur après le surfaçage. Une installation plus lente du végétal du fait de la diminution de la dose se traduit par une perte de qualité très forte et le risque de lessivage n'est pas maîtrisé à moyen terme.

- **Les caractéristiques du substrat** : Les essais réalisés ont montré que le choix du substrat en fonction de son comportement hydrique pouvait jouer un rôle dans la limitation du lessivage des éléments fertilisants. La capacité de ré-humectation du substrat semble être une caractéristique très importante à prendre en considération pour limiter le lessivage. Cette caractéristique intervient fortement dans le cas de conduite relativement sèche utilisée pour limiter les risques de maladies telluriques ou pour contrôler la croissance de la végétation car une faible capacité de ré-humectation nécessite d'apporter beaucoup d'eau lorsqu'il est nécessaire de réhumidifier le substrat et de corriger ses irrégularités d'humidité dans la parcelle. Pour cela, la composition du substrat, l'ajout d'un mouillant ou l'ajout d'argile, de zéolithe ou d'un amendement organique sont des leviers sur lesquels il est possible d'agir. L'argile ou la zéolithe semble intervenir plus par leur effet sur la ré-humectation du substrat que par leur effet sur l'amélioration de sa CEC qui a été peu impactée avec les doses utilisées dans ces essais. Mais, le rôle exact de ces facteurs serait toutefois à préciser.

Le tableau n°1 illustre les effets sur le lessivage du % de tourbe blonde du substrat et de l'incorporation d'argile ou de zéolithe lors d'essai sur *Escalonia ivelyi* en C4L de 2010 à 2012.

#### Lessivage cumulé des nitrates en g de NO<sub>3</sub> /plante /an dans 3 essais réalisés de 2010 à 2012

		Années d'expérimentation							
		2010		2011		2012			
		Osmocote Exact Standard 8-9 mois à 4 kg /m <sup>3</sup>		Osmocote Exact Standard 12-14 mois à 4 kg /m <sup>3</sup>		Osmocote Exact Standard 8-9 mois à 4 kg /m <sup>3</sup>		Osmocote Exact Standard 12-14 mois à 4 kg /m <sup>3</sup>	
% de tourbe blonde dans le substrat	Ajout de composés pour améliorer le substrat	Lessivage en g de NO <sub>3</sub> /plante /an	Ecart en %	Lessivage en g de NO <sub>3</sub> /plante /an	Ecart en %	Lessivage en g de NO <sub>3</sub> /plante /an	Ecart en %	Lessivage en g de NO <sub>3</sub> /plante /an	Ecart en %
60%		4,2		3,3		2,2		0,7	
80%		4,8	14,3	2,1	-37,2	2,3	3,1	1,0	52,5
60%	Ajout d'argile			1,6	-51,5	2,2	-1,5	0,5	-32,5
60%	Ajout de Zéolithe			2,8	-14,3				
80%	Ajout d'argile			2,3	-29,6				
80%	Ajout de Zéolithe			2,9	-11,2				
Moyenne		4,5		2,5		2,2		0,7	
Ecart en %									-67,6

Tableau 1 : lessivage des nitrates mesurés sur des cultures d'*Escallonia ivelyi* en C4L pour différentes caractéristiques de substrat (% de tourbe & incorporation d'argile ou de zéolithe). Irrigation par aspersion. Essais CATE de 2010 à 2012. La fertilisation au rempotage est précisée. Le lessivage des nitrates est exprimé en flux cumulé de NO<sub>3</sub> (en g de NO<sub>3</sub> /plante /an).

Dans ces essais réalisés, on observe que les effets du substrat sont cependant relativement variables d'une année à l'autre en fonction de l'irrigation et du régime des pluies. Ainsi, l'augmentation du % de tourbe du substrat de 60 à 80 % se traduit par une variation du lessivage de - 37% à +52%. Si le substrat joue un rôle dans le processus de lessivage, notamment à travers l'adéquation de la conduite des irrigations ou du régime des pluies par rapport à ses caractéristiques hydriques, il apparaît que les effets de la durée de libération des engrais incorporés dans le substrat apparaissent plus importants et plus constants.

- Le mode d'arrosage et la conduite des irrigations : ce facteur est essentiel car l'eau apportée en excès est le vecteur qui chasse les éléments minéraux du conteneur.

Cet effet a été étudié pour des systèmes en aspersion et au goutte-à-goutte. Nous avons pu observer qu'il était possible de limiter le lessivage de 35 % en moyenne en diminuant les doses d'eau à chaque irrigation et en optimisant la fréquence des irrigations grâce à un pilotage en fonction de paramètres climatiques (Cf figure n°6, tableau n°3). Cette pratique a cependant tendance à augmenter les irrégularités d'humidité entre conteneurs dans le cas de l'irrigation par aspersion. Elle a également des conséquences sur la croissance et le développement des plantes en favorisant une croissance plus végétative des plantes et en limitant ou retardant la floraison. Au goutte-à-goutte, nous avons pu également observer que le fractionnement des irrigations en diminuant la dose d'eau par arrosage permet d'envisager une fertilisation de complément par solution nutritive sans provoquer plus de lessivage pour autant car on limite sensiblement la production de percolats.

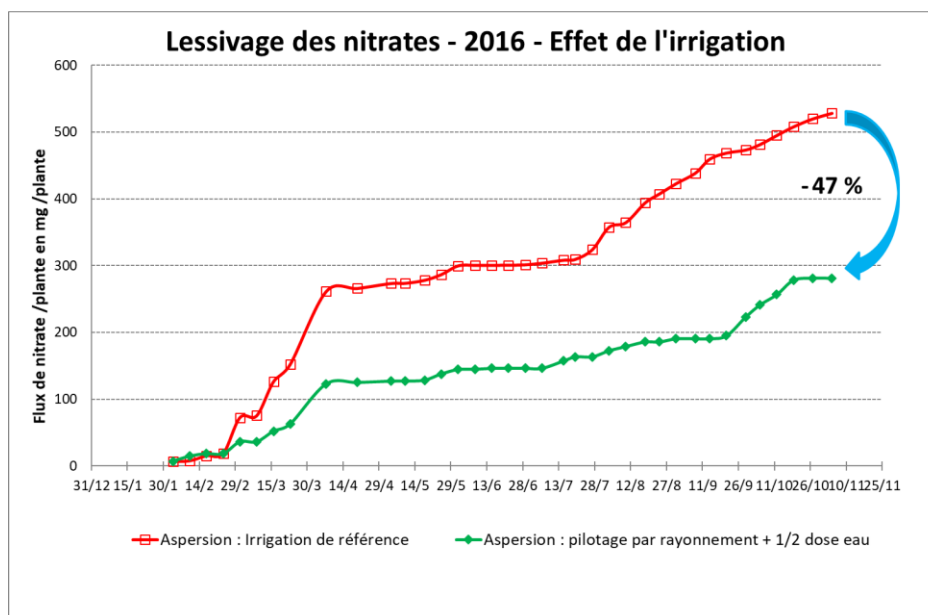


Figure 5 : lessivage des nitrates mesurés sur une culture d'*Escallonia iveyi* en C4L pour 2 conduites d'irrigation par aspersion, une conduite de référence et une conduite optimisée pour limiter la production de percolats et donc le lessivage (en adoptant les principes suivants : diminution de la dose d'eau /irrigation de 50% et fréquence des irrigations pilotée en fonction de la somme de rayonnement globale captée par la culture grâce à un solarimètre. Essai CATE 2016. Fertilisation au repotage : Osmocote exact Standard 12-14 mois à 4 kg /m<sup>3</sup>+ surfaçages fractionnés à demie dose. Substrat à 60 % de tourbe. Irrigation par aspersion

Le fractionnement des irrigations avec des doses d'eau par arrosage plus faible permet donc de limiter le lessivage des nitrates car on réduit la production de percolats. Par contre, l'optimisation de la fréquence des irrigations reste importante pour ne pas avoir de conséquence sur la croissance et la qualité des végétaux produits (Cf tableau n°2). Pour cela, lorsque la réserve en eau du substrat est épuisée, une nouvelle irrigation doit être déclenchée. Dans ces essais, l'optimisation des déclenchements des irrigations a été opérée grâce à un pilotage en fonction de la somme de rayonnement solaire captée par la culture (pilotage par solarimètre).

Modalités	Poids des parties aériennes (g)	% de plantes commercialisables
Aspersion de référence	276 g	75 %
Aspersion à ½ dose pilotée par RG	284 g	74,4 %

Tableau 2 : Croissance et qualité d'une culture d'*Escallonia iveyi* en C4L pour 2 conduites d'irrigation par aspersion, une conduite de référence et une conduite optimisée pour limiter la production de percolats et donc le lessivage (optimisation par diminution de la dose d'eau /irrigation de 50% et fréquence des irrigations pilotée en fonction de la somme de rayonnement globale captée par la culture grâce à un solarimètre. Essai CATE 2016.

Le tableau n°3 expose les % de réduction du lessivage des nitrates obtenus dans 4 essais du CATE grâce à une conduite optimisée de l'irrigation mise en place pour limiter la production de percolats et donc le lessivage (en adoptant les principes déjà évoqués précédemment : diminution de la dose d'eau /irrigation de 50% et fréquence des irrigations pilotée en fonction de la somme de rayonnement globale captée par la culture grâce à un solarimètre.

Essais	2015	2016-1	2016-2	2017	Moy
% de réduction du flux de NO <sub>3</sub> avec DE/2 et pilotage par RG	- 42 %	-47 %	-34 %	-20 %	- 35 %

Tableau 3 : % de réduction du lessivage des nitrates mesurés dans 4 essais réalisés au CATE de 2015 à 2017 grâce à une conduite optimisée de l'irrigation pour limiter la production de percolats et donc le lessivage (en adoptant les principes suivants : diminution de la dose d'eau /irrigation de 50% et fréquence des irrigations pilotée en fonction de la somme de rayonnement globale captée par la culture grâce à un solarimètre.

- Autres facteurs étudiés :

D'autres facteurs ont également été étudiés comme le mode de culture sous abri ou à l'extérieur et la période de rempotage. La pluie intervient dans le fonctionnement hydrique du système et n'est pas maîtrisée. Les températures déterminées par la production sous abri ou à l'extérieur ou la période de culture influencent le fonctionnement du système à travers la vitesse de croissance du végétal et donc son besoin instantané en éléments minéraux et par la vitesse de libération des engrais à libération programmée. L'équilibre du système peut donc être modifié.

Les observations réalisées sur ces systèmes de culture différents ainsi que sur 5 autres taxons (*Myrtus communis*, *Rhododendron*, azalée japonaise, *Camelia*, *Ceanothe*) montrent que le modèle et les principes de fonctionnement du système tel qu'il a été décrit précédemment restent valables.

Les premières évaluations environnementales réalisées au début du programme précédent montraient que la fuite de nitrates pouvait dépasser dans certaines situations à risques 2 à 3 g de NO<sub>3</sub>- percolé /plante /an (pour l'itinéraire observé). Ces observations montrent également que le lessivage des nitrates est un phénomène intermittent et fugace. De ce fait, à certaines périodes de l'année, les normes citées en préambule de ce document peuvent ne pas être respectées y compris pour des exploitations de petite dimension.

Depuis, avec les adaptations de la conduite et de l'itinéraire de culture qui ont été mises en œuvre grâce aux connaissances acquises entre 2010 et 2017, il a été possible dans ces expérimentations de descendre le flux de nitrates lessivés à 0,6 g de NO<sub>3</sub> /plante /an sans perdre au niveau de la qualité des végétaux à commercialiser (Cf figure n°7 et 8).

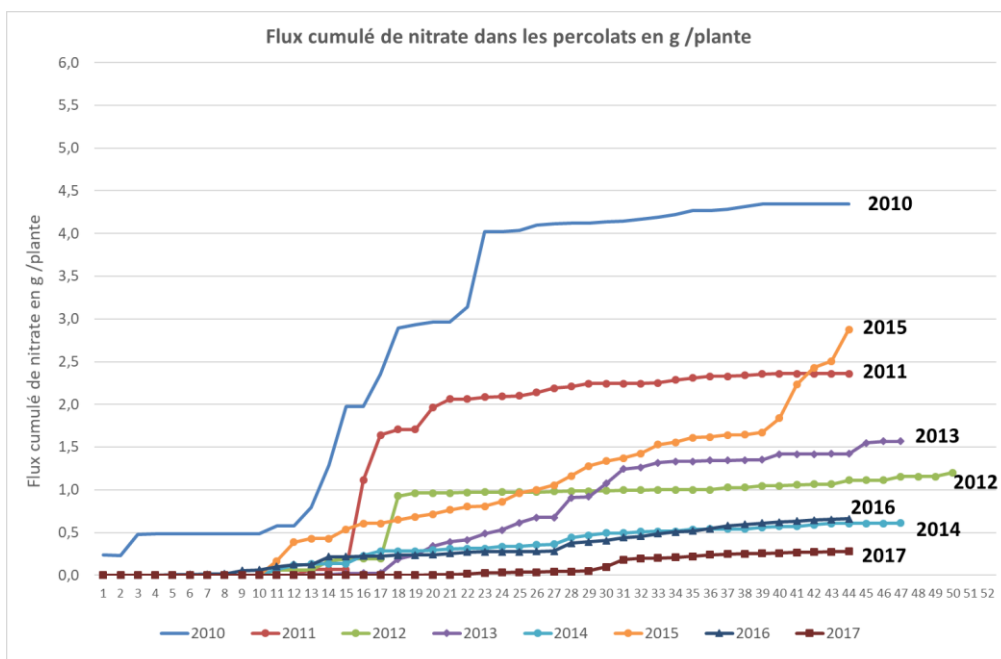


Figure 6 : lessivage moyen des nitrates mesurés dans les différents essais réalisés au CATE entre 2010 et 2017. Pour chaque année, les valeurs correspondent à la moyenne de toutes les modalités étudiées. Lessivage cumulé des nitrates exprimés en g /plante /an

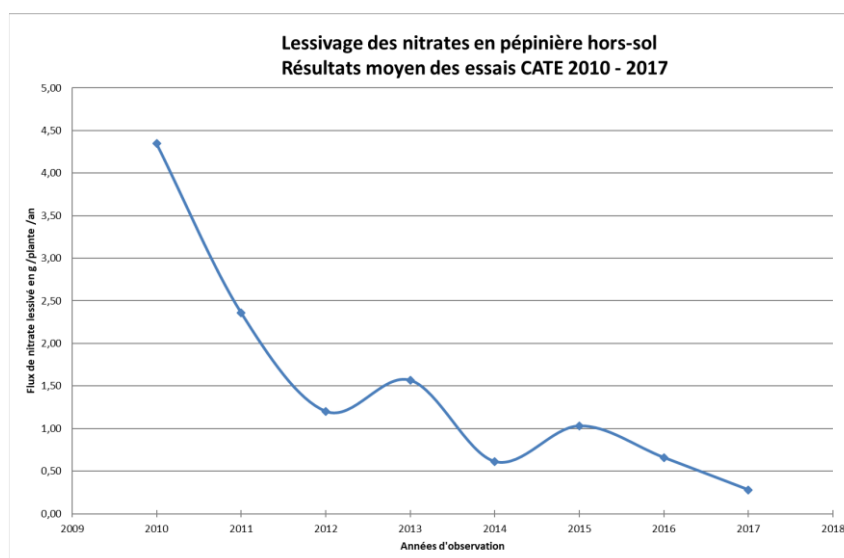


Figure 7 : évolution du lessivage des nitrates mesurés dans les différents essais réalisés au CATE entre 2010 et 2017. Les valeurs correspondent à la moyenne de toutes les modalités étudiées chaque année. Lessivage cumulé des nitrates exprimés en g/plante /an.

**C'est la prise en compte des interactions entre les facteurs influençant le fonctionnement du système plante en conteneurs dans sa globalité et cela dans le cadre d'une compréhension dynamique du lessivage qui a permis cette avancée. Toutefois, cette évolution bien qu'intéressante apparaît encore insuffisante au regard des objectifs fixés.**

Les expérimentations réalisées ont permis de mieux comprendre le phénomène du lessivage des nitrates en pépinière hors-sol et d'évaluer des pistes d'amélioration tout en conservant un haut niveau de qualité des végétaux produits.

L'exploration de l'effet de la croissance des végétaux sur le fonctionnement du système a commencé à être explorée. Les observations réalisées montrent clairement que les périodes où les plantes sont peu développées sont des périodes à fort risques de lessivage.

Le recyclage des eaux de drainage est proposé en pépinière hors-sol comme pour d'autres systèmes de culture hors-sol afin de diminuer les impacts environnementaux. On pourrait estimer que la mise en œuvre de ce procédé rend inutile la limitation du lessivage des éléments fertilisants par l'optimisation des itinéraires de culture. Mais, une analyse plus approfondie de la situation montre que le recyclage en pépinière hors-sol est un procédé qui peut être très coûteux et nécessiter des aménagements lourds si on veut s'assurer d'un recyclage sans fuite (sans infiltration dans les fossés de drainage par exemple). De plus, en hiver, une aire de culture imperméabilisée capte tellement d'eau qu'il est souvent impossible et inutile de tout stocker. Aussi, maîtriser le lessivage des éléments fertilisants en amont et en diminuer le risque par l'application de techniques de culture et de conduites adaptées aux objectifs de production et aux contraintes reste une stratégie pertinente. Elle sera dans de nombreux cas beaucoup moins coûteuse que la mise en place d'aménagements lourds pour assurer un recyclage complet des eaux de drainage.

#### **4. La re-fertilisation en cours de culture (les surfaçages) :**

**une pratique de production indispensable pour l'élaboration de la qualité :**

En culture hors-sol, le système de fertilisation basé sur l'utilisation des engrais à libération programmée ne permet pas dans la grande majorité des cas de figure d'apporter la totalité de la fertilisation dans le substrat au moment du repotage. Cette façon de procéder engendre de forte salinité qui pénalisent la plupart des espèces d'arbustes, avec des conséquences qui peuvent être létales. Aussi, des re-fertilisations en cours de culture sont généralement mises en œuvre.

Ces re-fertilisations, appelées communément surfaçages car elles consistent à déposer un poquet d'engrais à la surface du substrat de chaque conteneur cultivé, ont un impact très intéressant sur la croissance des végétaux et très bénéfique sur leur qualité finale. Le tableau n°4 ci-dessous montre dans 4 essais différents qu'une augmentation de la concentration d'engrais de 42 % (en passant de 4 kg /m<sup>3</sup> de substrat, dose incorporée au rempotage, à 7 kg /m<sup>3</sup> avec une fertilisation de complément de 3 kg /m<sup>3</sup>) permet un accroissement moyen de la biomasse de 44 % et un accroissement du % de plantes commercialisable de 83 %.

**Effet du surfaçage sur la croissance et la qualité des arbustes en conteneur**

Année d'essai	Espèce	Litrage	Fertilisation au rempotage	Fertilisation de complément	Poids moyen des parties aériennes (en g /plante)	Ecart en %	% de plantes commercialisables	Ecart en %
2021	Viburnum tinus	C4L	(1)	Avec surfaçages (3)	213	56,6	97	39,9
2021	Viburnum tinus	C4L	(1)	Sans surfaçage	136		70	
2022	Viburnum tinus	C4L	(1)	Avec surfaçage (4)	249	35,3	67	178,7
2022	Viburnum tinus	C4L	(1)	Sans surfaçage	184		24	
2021	Myrtus communis	C7L	(2)	Avec surfaçages (5)	211	56,3	84	78,8
2021	Myrtus communis	C7L	(2)	Sans surfaçage	135		47	
2022	Myrtus communis	C7L	(2)	Avec surfaçages (5)	437	27,8	92	35,3
2022	Myrtus communis	C7L	(2)	Sans surfaçage	342		68	
Moyenne (en %)						44,0		83,2

(1) Osmocote Exact Stand 12-14 mois à 4 kg /m<sup>3</sup>

(2) Osmocote Exact Stand 12-14 mois à 3 kg /m<sup>3</sup>

(3) 2 surfaçages avec Osmocote Top Dress à 1,5 kg /m<sup>3</sup> de substrat.

(4) 1 surfaçage avec Osmocote Top Dress à 3 kg /m<sup>3</sup> de substrat.

(5) 1 surfaçage avec Osmocote Exact 8-9 m à 1 kg /m<sup>3</sup> + 1 surfaçage avec Osmocote Top Dress à 1,5 kg /m<sup>3</sup> de substrat.

Tableau 4: Effet du surfaçage sur la croissance et la qualité des végétaux produits en conteneur dans 4 essais réalisés au CATE.

Sans cette pratique de re-fertilisation en cours de culture, Le % de plantes commercialisables produites reste complètement insuffisant pour rentabiliser le processus de production du fait des exigences de qualité imposées par le marché des végétaux. La dose totale d'engrais apportée aux plantes en cours de culture explique une grande partie les niveaux de croissance et de qualité atteints.

La figure n°9 illustrent les effets sur le poids moyen des parties aériennes de *Viburnum tinus* produit en conteneur de 4 litres de concentrations croissantes d'engrais à libération programmée (dose totale d'engrais apportée au cours de la culture, additionnant la dose incorporée au rempotage et le ou les apports par surfaçage).

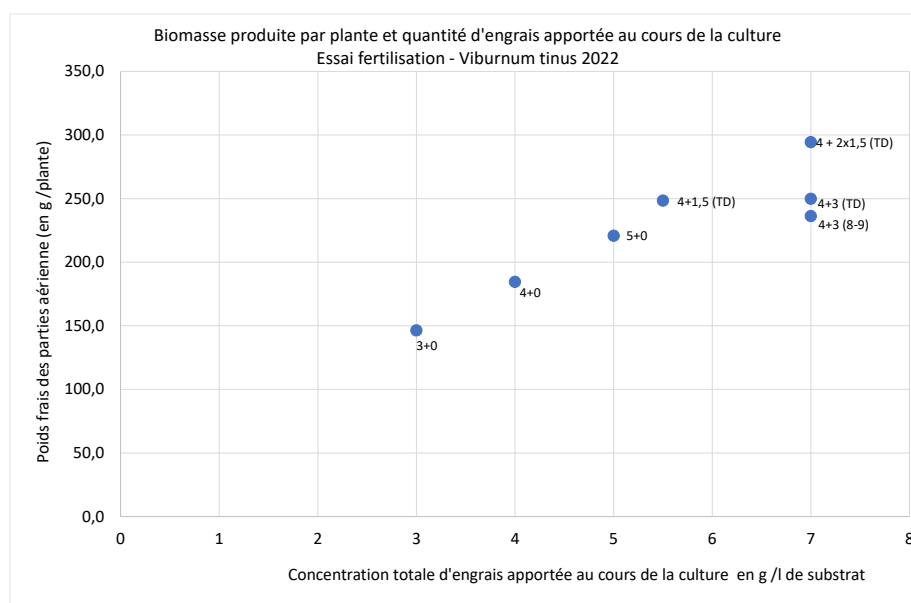


Figure 8: Poids moyen des parties aériennes de *Viburnum tinus* en C4L pour différents niveaux de fertilisation du substrat apporté par 7 programmes de fertilisation différents (Essai CATE 2022).

3+0, 4+0, 5+0 correspondent à la concentration d'Osmocote Exact Standard 12-14 mois incorporée au rempotage respectivement de 3, 4 ou 5 kg /m<sup>3</sup> sans surfaçage. 4+1,5, 4+ 2x1,5, 4+3 correspondent à une concentration d'Osmocote Exact Standard 12-14 mois (15-9-11) incorporée au rempotage de 4 kg /m<sup>3</sup> plus surfaçage avec 1,5, 2 fois 1,5 ou 3 kg d'engrais /m<sup>3</sup>. Les engrais de surfaçage sont soit osmocote TopDress 22-5-6 (TD), soit Osmocote Exact Standard 8-9 mois (15-9-11).

En conteneur, la croissance du *Viburnum tinus* est donc proportionnelle à la dose d'engrais incorporée entre 3 et 5,5 kg d'engrais. Au-delà de cette dose, le ou les surfaçages sont plus ou moins bien valorisés selon leur mise en œuvre. Mais,

rappelons que l'utilisation de cette concentration d'engrais de 7 kg /m<sup>3</sup> durant le cycle de culture est indispensable pour atteindre les références de qualité exigées pour la commercialisation des végétaux. Les avantages de l'augmentation de la concentration d'engrais ne se traduisent pas seulement par un gain de croissance mais aussi sur d'autres critères de qualité comme la densité de la ramification, la densité et la coloration du feuillage, l'homogénéité du peuplement.....

### Mais une pratique aux conséquences environnementales encore peu prise en considération

Comme l'évoque les résultats cités précédemment, Un certain nombre d'essais réalisés au CATE montrent que les re-fertilisations en cours de culture peuvent se traduire par un accroissement non négligeable du risque de lessivage des nitrates. Cette pratique influence fortement le bilan environnemental de la culture. Ce constat est illustré par la figure n°10 qui présente l'évolution du lessivage des nitrates d'une culture de *Viburnum tinus* en C4L produite avec ou sans surfaçage (selon une pratique de référence).

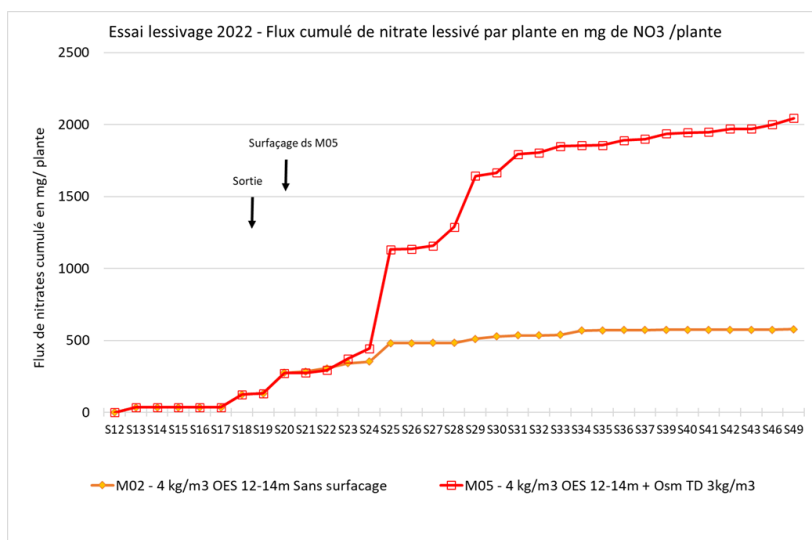


Figure 9 : Perte cumulée de nitrate par lessivage (flux) au cours d'une culture de *Viburnum tinus* en C4L avec ou sans surfaçage. (en mg de NO<sub>3</sub> lessivé /plante /an). La fertilisation au rempotage est identique pour les 2 modalités (4 kg /m<sup>3</sup> d'Osmocote Exact Standard 12-14 mois (15-9-11). La modalité surfacée a subi 1 surfaçage avec Osmocote TopDress à 3 kg/m<sup>3</sup>. Essai CATE 2022.

Avec le surfaçage, tel qu'il a été mis en œuvre dans cet essai, le lessivage des nitrates est donc multiplié par 4. Cette pratique de réaliser un seul surfaçage au cours de la culture avec une dose d'engrais relativement élevée (qui représente 42 % de l'apport total d'engrais à la culture dans ce cas de figure) reste prédominante chez les producteurs car le temps de main d'œuvre associé à la mise en œuvre des re-fertilisation est important.

Il apparaît toutefois que le risque de lessivage associé à la mise en œuvre d'un surfaçage varie fortement en fonction des dates de réalisations des surfaçages (du stade de la culture), du délai séparant le rempotage du surfaçage, de l'espèce et de ces exigences, des types d'engrais de surfaçage utilisés et des doses mises en œuvre mais aussi en fonction de la pluviométrie et des conditions météorologiques.

### Le fractionnement des doses pour diminuer les risques de lessivages

Face à ses observations, de nouvelles pratiques de surfaçage ont été testées pour limiter les risques de lessivage. Ainsi, comme en grande culture, les résultats de plusieurs essais montrent que le fractionnement des doses d'engrais nécessaires à la re-fertilisations en cours de culture en plusieurs passages (2 passages à la place de 1 ou 3 à la place de 2) est un moyen de limiter fortement la quantité de nitrates lessivés. Les résultats de l'essai réalisé en 2022 sur *Viburnum tinus* en C4L au CATE illustre ce propos (figure n°11).

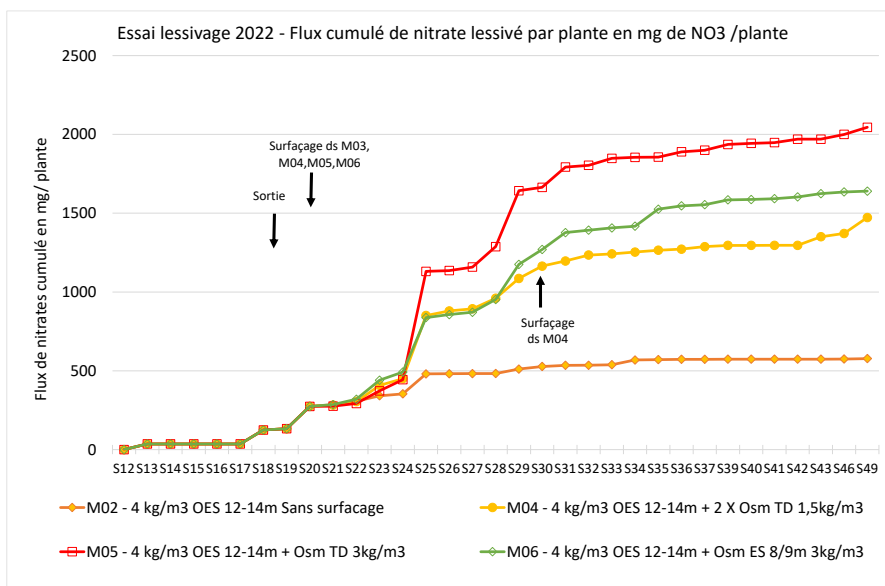


Figure 10 : Perte cumulée de nitrate par lessivage (flux) au cours d'une culture de *Viburnum tinus* en C4L avec ou sans surfacage. (en mg de NO<sub>3</sub> lessivé /plante /an). La fertilisation au repotage est identique pour toutes les modalités (4 kg /m<sup>3</sup> d'Osmocote Exact Standard 12-14 mois (15-9-11). La modalité surfacée M04 a subi 2 surfacages avec Osmocote TopDress à 1,5 kg /m<sup>3</sup> alors que la modalité surfacée M04 a subi 1 seul surfacage avec Osmocote TopDress à 3 kg /m<sup>3</sup>. La modalité surfacée M06 a subi quant à elle 1 seul surfacage avec Osmocote Exact Standard 8-9 mois à 3 kg /m<sup>3</sup>. Essai CATE 2022.

Dans cet essai, le fractionnement du surfacage en réalisant 2 surfacages espacés de 67 jours avec une concentration d'engrais de 1,5 kg /m<sup>3</sup> à la place d'un seul apport à 3 kg d'engrais /m<sup>3</sup> a permis de diminuer la quantité de nitrate lessivé au cours de la culture de 28 %.

Cette diminution du lessivage a permis une meilleure valorisation des éléments fertilisants apportés dans la modalité avec le surfacage fractionné M04 puisque la croissance des plantes est améliorée de 18 % et le % de plantes commercialisables de 26 % par rapport à la modalité non fractionné M05 alors que la dose totale d'éléments fertilisants apportés et le type d'engrais sont identiques dans les 2 modalités (Cf tableau n°5).

Essai lessivage 2022 - Effet du surfacage sur la croissance et la qualité des arbustes en conteneur

Modalités	Fertilisation au repotage	Fertilisation de complément	Concentration totale d'engrais apportée à la culture (en kg /m <sup>3</sup> de substrat)	Poids moyen des parties aériennes (en g /plante)	% de plantes commercialisables
M02	Osmocote Exact Standard 12-14 mois à 4 kg /m <sup>3</sup>	Sans surfacage	4	184	24
M04		Avec surfacage : 2 surfacages avec Osmocote Top Dress à 1,5 kg /m <sup>3</sup> de substrat.	7	294	85
M05		Avec surfacage : 1 surfacage avec Osmocote Top Dress à 3 kg /m <sup>3</sup> de substrat.	7	249	67
M06		Avec surfacage : 1 surfacage avec Osmocote Exact Standard 8-9 mois à 3 kg /m <sup>3</sup> de substrat.	7	236	56

Tableau 5 : Effet de différentes pratiques de surfacage sur la croissance et la qualité des végétaux produits en conteneur. Essai lessivage 2022 du CATE réalisé sur *Viburnum tinus* en C4L.

Ces effets du fractionnement des doses d'engrais apportés en surfacage sur la diminution du lessivage des nitrates durant la culture ont été observés dans d'autres essais réalisés à la station du CATE et se traduisent par une diminution moyenne du lessivage des nitrates de 31 % (pour des essais avec le même type d'engrais, la même dose d'engrais apportée, toute chose étant égale par ailleurs. Cf tableau n°6).

Année d'essai	Réduction du lessivage des nitrates lié au fractionnement en % (même engrais & situations comparables par ailleurs)
2016	-42
2017	-46
2020	-6
2022	-28
Moyenne	-31

Tableau 6 : % de réduction du lessivage des nitrates au cours de la culture obtenu par le fractionnement des doses d'engrais apportés en surfaçage (4 essais pour des surfaçages réalisés avec les mêmes engrais de surfaçage, une dose totale d'engrais apportée équivalente et toute chose étant égale par ailleurs)




De façon à mieux comprendre la variabilité des effets des surfaçages sur le lessivage des nitrates, des observations plus précises ont été réalisées entre 2019 et 2022. Comme, il est apparu que cette variabilité semblait très liée au niveau de croissance atteint par les plantes lors de la réalisation des surfaçages, la démarche adoptée a consisté à mettre en parallèle la dynamique de la croissance des plantes au cours de la culture (à travers la mesure de la vitesse de croissance notamment), la dynamique du lessivage des nitrates et le positionnement des surfaçages.

## 5. Le rôle de la vitesse de croissance des plantes lors des surfaçages sur le risque de lessivage

Les principaux résultats des essais réalisés au CATE en 2020, 2021 et 2022 concernant cette question sont présentés dans les paragraphes suivants. Ils ont été obtenus à partir d'observations réalisés sur des cultures de *Viburnum tinus* en conteneur de 4 litres rempotés sous abri puis sortie au printemps et irrigués par aspersion. Le même programme de fertilisation a été utilisé pour ces différentes séries : incorporation dans le substrat au repotage de 4 kg /m<sup>3</sup> d'Osmocote Exact Standard 12-14 mois (15-9-11) puis mise en oeuvre de 2 surfaçages avec Osmocote TopDress à 1,5 kg /m<sup>3</sup>. Par contre, les dates de surfaçage ont varié d'une année à l'autre.

Au cours de ces essais, la croissance des plantes a été mesurée par des pesées régulières des parties aériennes d'échantillons de végétaux au cours du temps (toutes les 2 à 4 semaines). Il a ainsi été possible de calculer la vitesse de croissance des plantes (en gramme de poids frais /jour /plante) aux différentes périodes des cultures et d'observer l'évolution de celle-ci. Le lessivage des nitrates a été quant à lui mesuré chaque semaine dans les différentes modalités en essai. De façon à tenir compte de l'évolution de la biomasse et permettre les comparaisons entre modalités et années d'essai, la vitesse de lessivage, c'est à dire la quantité de nitrates lessivés / gramme de biomasse produite /jour /plante a également été calculée (en mg de NO<sub>3</sub> lessivé / gramme de biomasse produite /jour /plante). La présence de nitrate dans le substrat a aussi été mesurée dans certains essais par la technique des percolats provoquées associée à la mesure de la concentration en nitrate des percolats par Nitrachek.

Les figures n°12, 13, 14 et 15 ci-dessous mettent en parallèle la vitesse de croissance des plantes et la vitesse de lessivage. Pour faciliter la lecture de ces graphiques, 3 types de situations ont été identifiées par les idéogrammes suivants :

-  - Périodes où la vitesse de croissance est faible ou insuffisante et est associée à une vitesse de lessivage élevée ou en croissance.
-  - Périodes où la vitesse de croissance est forte mais décroissante et est associée à une vitesse de lessivage croissante.
-  - Périodes où la vitesse de croissance est élevée ou augmente et est associée à une vitesse de lessivage faible ou décroissante.

Pour les plantes rempotées en janvier de l'essai 2020 (figure n°12), le premier pic de lessivage observé est lié à la libération excessive de l'engrais incorporé dans le substrat du fait des conditions climatiques alors que la vitesse de croissance est faible. Ensuite, le 1<sup>er</sup> surfaçage réalisé un peu trop tôt par rapport à la vitesse de croissance accroît dans un premier temps le lessivage avant que la situation ne s'inverse. Puis, l'augmentation de la vitesse de croissance à partir de fin juin est associée à une diminution de la vitesse de lessivage qui se poursuit après le 2<sup>ème</sup> surfaçage. La situation s'inverse à nouveau à partir d'octobre où la croissance ralentit du fait du climat.

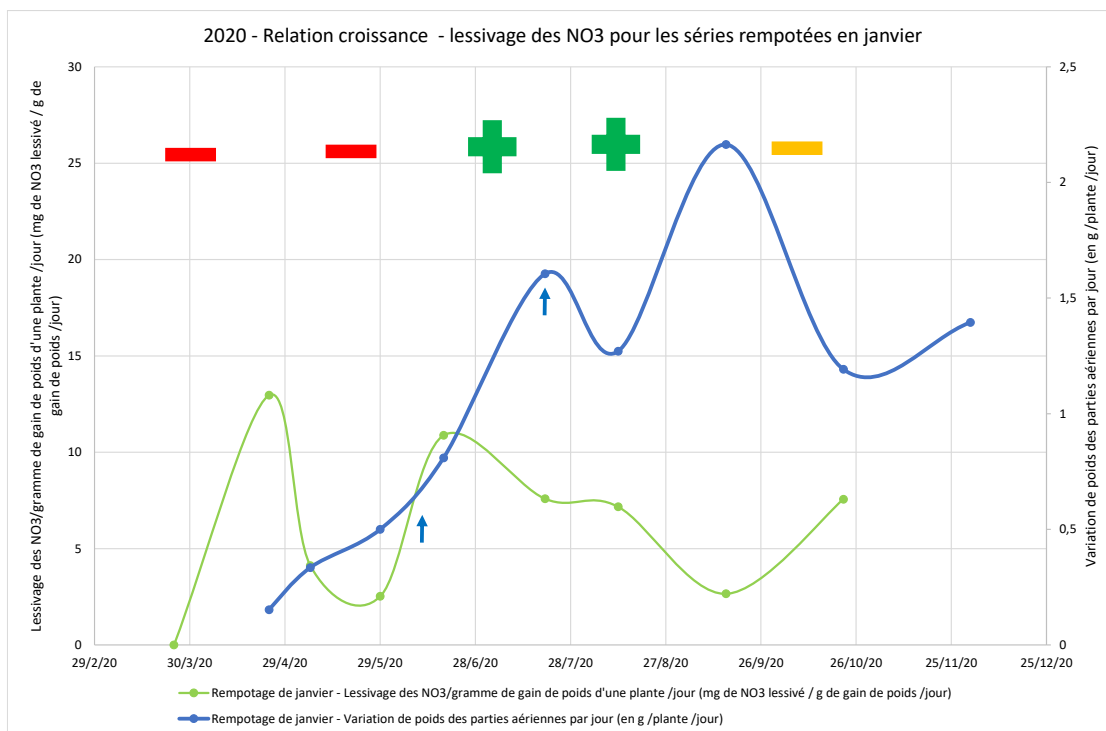


Figure 11 : Evolution de la vitesse de croissance des plantes (en g de biomasse /jour /plante) et de la vitesse de lessivage (mg de NO3 lessivé / gramme de biomasse produite /jour /plante). Les 2 flèches positionnent les surfacages réalisés. Essai CATE 2020 sur *Viburnum tinus* en C4L. Rempotage de janvier 2020.

Pour les plantes repotées en avril de l'essai 2020 (figure n°13), on retrouve également un premier pic de lessivage lié probablement à la libération excessive de l'engrais incorporé dans le substrat alors que la vitesse de croissance est faible. Le premier surfacage réalisé plus tôt après le repotage que pour la série précédente, à un moment où la vitesse de croissance est plus faible, se traduit par un accroissement rapide du lessivage. L'accélération de la croissance en août consécutive aux 2 surfacages se traduit par une diminution brutale du lessivage. Mais, en octobre, les conditions pour la croissance étant moins réunies, le lessivage réaugmente à nouveau.

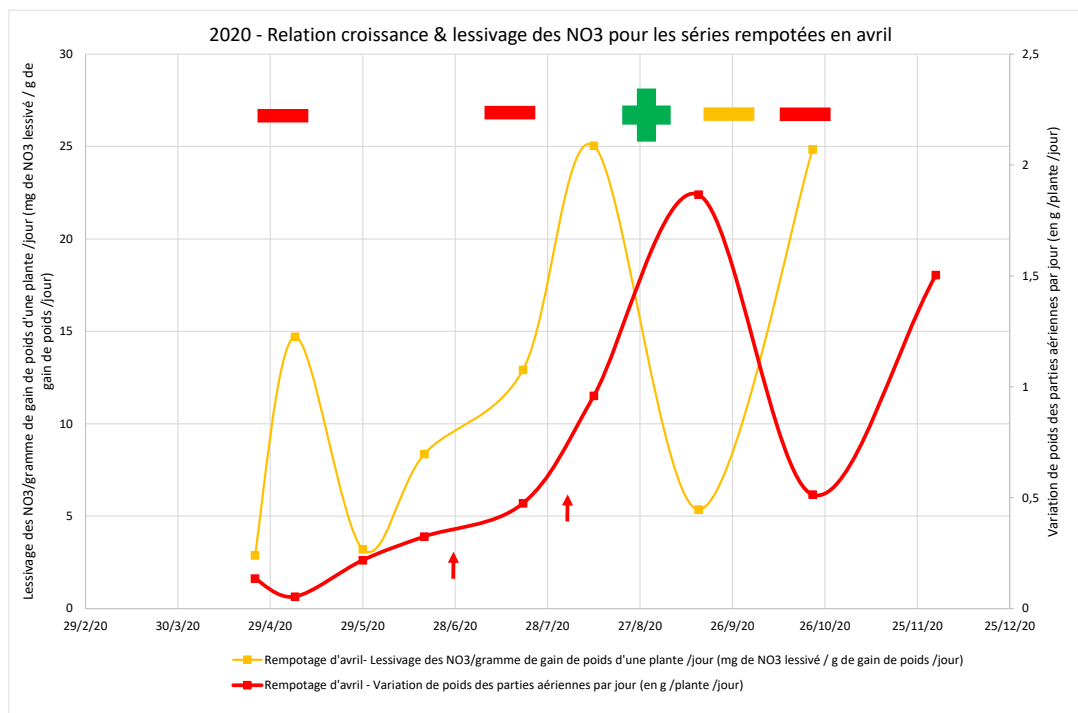


Figure 12 : Evolution de la vitesse de croissance des plantes (en g de biomasse /jour /plante) et de la vitesse de lessivage (mg de NO3 lessivé / gramme de biomasse produite /jour /plante). Les 2 flèches positionnent les surfacages réalisés. Essai CATE 2020 sur *Viburnum tinus* en C4L. Rempotage d'avril 2020.

Pour la culture réalisée en 2021 (figure n°14), on retrouve également des périodes caractéristiques où un lessivage important peut être associé à des situations de croissance faible ou insuffisante et inversement des périodes de croissances plus actives où le lessivage s'atténue. Mais, du fait de la météorologie de l'année, ces situations semblent fluctuer plus rapidement.

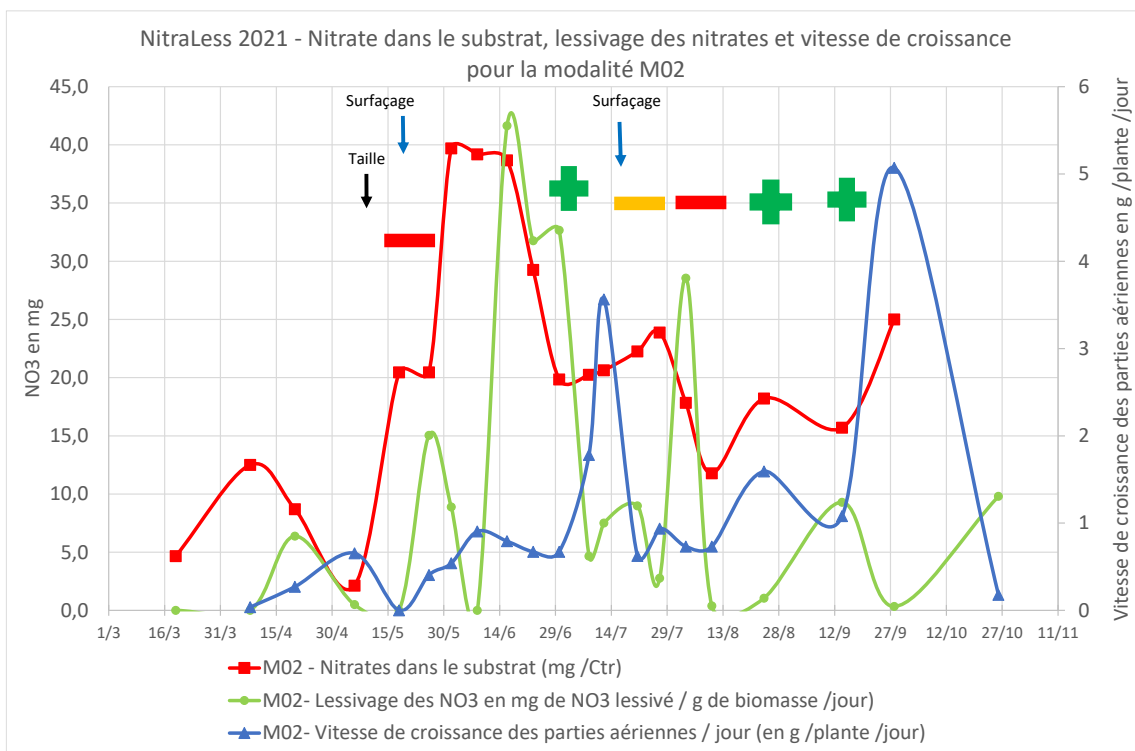


Figure 13 : Evolution de la vitesse de croissance des plantes (en g de biomasse /jour /plante), de la vitesse de lessivage (mg de NO3 lessivé / gramme de biomasse produite /jour /plante) et de la présence de nitrates dans le substrat (exprimée en mg de NO3 /conteneur). Essai CATE 2021 sur Viburnum tinus en C4L.

Suite au premier surfaçage, la solution du substrat s'enrichit en nitrate. Puis, il s'ensuit un pic de lessivage. La croissance de la plante n'intervient qu'après un certain temps lié à l'absorption et la métabolisation des éléments minéraux apportés. Pour le 2ème surfaçage, cette succession est moins nette et on n'observe pas un enrichissement aussi net du substrat en nitrate du fait de l'absorption par la plante et du lessivage.

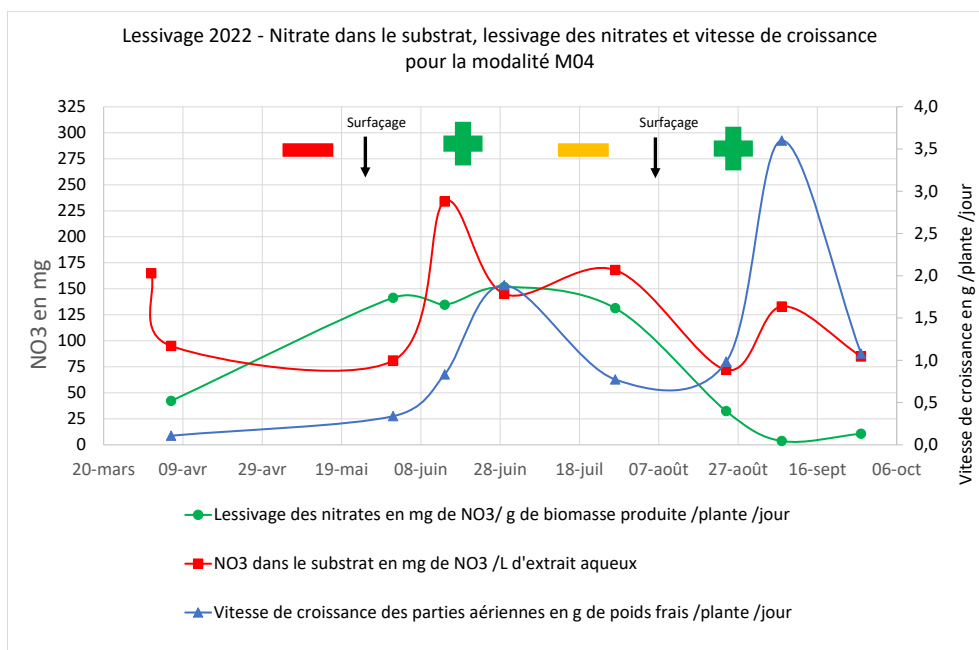


Figure 14 : Evolution de la vitesse de croissance des plantes (en g de biomasse produite /jour /plante), de la vitesse de lessivage (mg de NO3 lessivé / gramme de biomasse produite /jour /plante) et de la présence de nitrates dans le substrat (en mg de NO3 /L d'extrait aqueux). Essai CATE 2022 sur Viburnum tinus en C4L.

Lors de l'essai réalisé en 2022 (figure n°15), les vitesses de lessivages mesurées ont été beaucoup plus élevées que celles enregistrées précédemment. En première partie de culture, l'enrichissement du substrat en nitrate est très élevé (beaucoup plus que les années précédentes) et l'accélération de la croissance en juin ne peut que freiner le lessivage à cette période. Il faut vraiment que la vitesse de croissance augmente fortement à la fin de l'été pour qu'il soit possible d'observer une diminution très nette du lessivage des nitrates.

Les descriptions précédentes sont relativement sommaires. **Mais, il semble toutefois apparaitre une coïncidence entre les périodes où la croissance est rapide et celles où le lessivage des nitrates diminue ou est faible ainsi qu'une coïncidence entre les périodes où la croissance est limitée ou ralentie et celles où le lessivage des nitrates s'accroît ou est élevée.**

L'analyse de ces résultats pourrait être bien plus approfondies. Elle nécessiterait la prise en compte de tous les processus qui interviennent dans le fonctionnement du système qui régule la quantité de nitrate dans le substrat : apport de nitrates solubles et directement disponibles par la fertilisation, libération de nitrates retenus dans les granules des engrais à libération programmée, minéralisation de l'azote organique, absorption par les racines, réorganisation par des bactéries, lessivage par des excès d'irrigation ou par la pluie ou au contraire, absence de lessivage en période plus sèche, colonisation du substrat par les racines.... Ces processus interagissent entre eux et influencent les différents flux de nitrate qui parcourent ce système. Ils sont de plus soumis aux effets de différents facteurs environnementaux qui varient à différentes échelles de temps. Il serait de plus également nécessaire de tenir compte des stocks d'azote présents dans chaque compartiment du système.

L'équilibre qui en résulte est forcément complexe à analyser. Toutefois, **les observations précédentes laissent penser que la capacité d'absorption des nitrates par la plante qui est associée à la croissance est un élément central du fonctionnement du système qui régule la quantité de nitrate dans le substrat et participe à la limitation du risque de lessivage des nitrates.**

Les données des essais examinés précédemment ont été rassemblées dans la figure n°16 afin de préciser la relation qui existe entre la vitesse de croissance et la vitesse de lessivage. Du fait des temporalités différentes qui s'exercent sur la croissance et sur le lessivage et de nombreux autres facteurs qui interviennent sur ces phénomènes, il n'est pas possible d'établir une corrélation au sens strict. Cependant, il semble qu'on puisse observer un effet de seuil au niveau de la vitesse de croissance des plantes. Pour les essais analysés, ce seuil se situe approximativement à 1 g de biomasse produite /jour /plante.

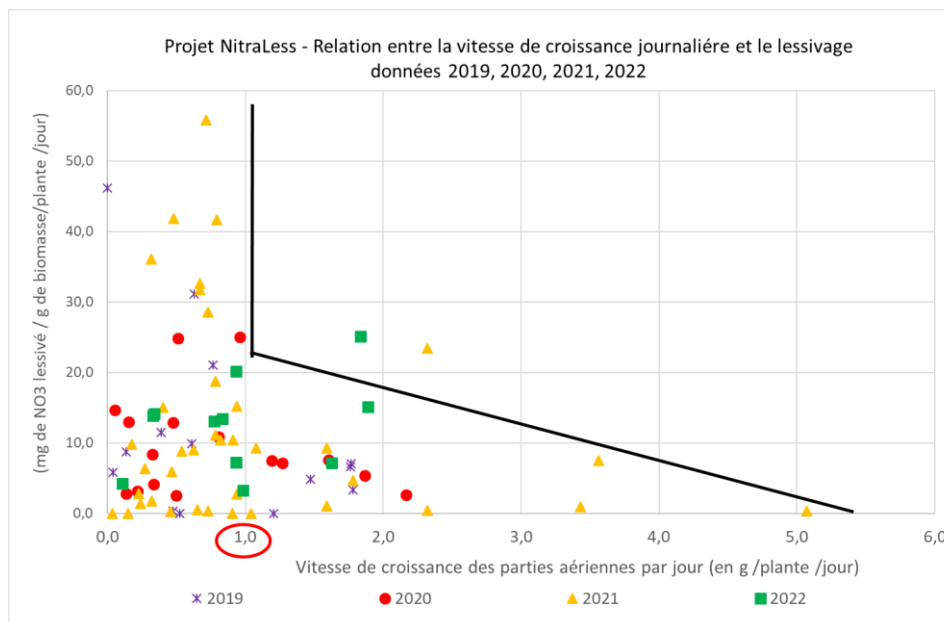


Figure 15 : Relation entre la vitesse de croissance des plantes et la vitesse de lessivage des nitrates. Données par période calculées à partir des résultats des essais CATE 2019 à 2022.

Ces mêmes données séparées entre celles inférieures ou supérieures à ce seuil de 1g de croissance /plante /jour et présentées dans le tableau de contingence suivant (tableau n°7) laissent penser que les distributions des vitesses de lessivages sont différentes au seuil 5% autour de ce niveau de croissance (p-value : 0.01298 obtenue avec le test exact de Fisher sur les effectifs par classe).

**Relation entre la vitesse de croissance des plantes et le lessivage des nitrates**  
**(données 2019, 2020, 2021 et 2022)**

% des mesures réalisées		Lessivage des nitrates en mg / jour / gramme de poids frais /plante				Total
		0 à 5 mg /g	5 à 10 mg /g	10 à 20 mg /g	> 20 mg /g	
Vitesse de croissance des plantes en g de poids frais /plante /jour	De 0 à 1 g /plante /jour	35 %	15 %	26 %	24 %	100,0%
	> 1 g /plante /jour	48 %	39 %	4 %	9 %	100,0%

Tableau 7 : Relation entre la vitesse de croissance des plantes et la vitesse de lessivage des nitrates. Données par période calculées à partir des résultats des essais CATE 2019 à 2022.

Ces observations vont dans la même direction que les conclusions de Recous et collaborateurs (2011) pour qui les études avec des méthodes dynamiques en grandes cultures montrent une relation étroite entre l'utilisation de l'azote apporté et la vitesse de croissance au moment de l'apport et entre les pertes d'azote et l'utilisation par les plantes. Ces auteurs citent l'importance de l'état du couvert au moment de l'apport d'azote pour maximiser l'utilisation de l'engrais par la culture et minimiser les pertes.

Les résultats des essais présentés précédemment tendent à montrer que lorsque la vitesse de croissance journalière des plantes dépasse le seuil de 1 g de biomasse fraîche produite /jour /plante, le risque de lessivage des nitrates associé à l'enrichissement du substrat en nitrate du fait de la réalisation d'un surfaçage se trouve réduit. Et inversement, le risque de lessivage est nettement accru si l'enrichissement du substrat en nitrate par le surfaçage est réalisé lorsque la vitesse de croissance est inférieure à ce seuil de 1 g de biomasse fraîche /jour /plante.

En retour, il est aussi important de noter que la vitesse de croissance est influencée à terme par la réalisation du surfaçage qui accroît la fertilité du substrat. Notre expérience nous rappelle aussi que le fait de retarder le 1<sup>er</sup> surfaçage pour tenter de limiter les risques de lessivage a pour conséquence de retarder la croissance des plantes et peut pénaliser fortement la qualité des végétaux en fin de culture avec des répercussions économiques non négligeables.

Il serait intéressant d'utiliser une variable plus facile d'accès que le poids des parties aériennes qui est une mesure destructrice pour évaluer la vitesse de croissance. Dans l'essai réalisé sur *Myrtus communis* en C7L en 2022, une forte corrélation a été observée entre l'évolution du poids des parties aériennes au cours de la culture et l'évolution de la longueur des ramifications (R= 0,94).

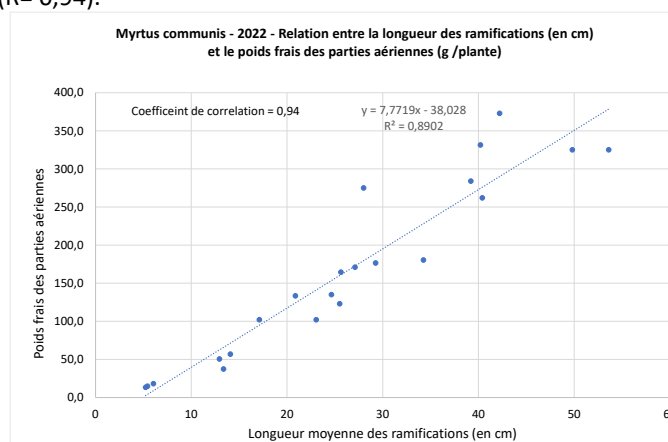


Figure 16 : Relation entre l'évolution de la biomasse des parties aériennes et l'évolution de la longueur des ramifications sur *Myrtus communis* Coefficient de corrélation = 0,94. (Essai CATE 2022).

Ces travaux soulignent l'intérêt qu'il pourrait y avoir à piloter la date et la dose d'engrais apportée lors des surfaçages (et notamment du 1<sup>er</sup> surfaçage) en fonction de la vitesse de croissance des plantes au moment du surfaçage.

Pour le moment, ces informations ne sont pas prises en compte dans les règles de décisions qui servent à piloter les surfaçages mais, il apparaît que la question de l'optimisation du calendrier de surfaçage à mettre en œuvre pour les cultures d'arbustes en hors-sol constitue une question technico-économique très importante pour la durabilité des systèmes de culture.

La présence de nitrate disponible dans la solution du substrat est également un indicateur complémentaire à utiliser pour préciser le calendrier de surfaçage. Cet indicateur est déjà connu mais très peu utilisé dans les faits. Suite aux observations des essais précédents, il est possible de fixer dès à présent quelques règles de décision au niveau de la concentration de nitrates à rechercher dans le substrat pour le pilotage de la fertilisation (à partir de la mesure de la concentration en nitrate des percolats provoqués) :

- une concentration en nitrates dans le substrat supérieur à 150 mg /L n'est pas utile et risque d'accroître fortement le risque de lessivage.
- le niveau correct pour aboutir à une croissance rapide (>1 g /plante /jour) semble se situer entre 50 et 150 mg /L de nitrates dans le substrat.
- en situation de croissance très rapide (>2 g /plante /jour) avec une plante développée, des concentrations inférieures à 50 mg de NO<sub>3</sub> /L dans le substrat peuvent être observées car le prélèvement de la plante est alors important mais cette concentration ne doit pas descendre durablement en dessous de 20 mg /L pour ne pas risquer de se placer en situation de carence.
- les situations où la concentration en nitrates du substrat est durablement inférieure à 20 mg /L entraînent un fort ralentissement de la croissance.

Ces valeurs seront progressivement affinées au fur et à mesure des expérimentations à venir.

## **6. Le pilotage de la fertilisation de complément en cours de culture : de la modulation des surfaçages à la mesure du statut azoté des plantes**

### **La modulation des doses et des dates de surfaçages comme 2<sup>ème</sup> levier pour diminuer les risques de lessivages**

Si les travaux précédents laissent penser qu'il pourrait être intéressant de tenir compte de la vitesse de croissance comme indicateur pour faciliter le pilotage des surfaçages, ils suggèrent également qu'il serait nécessaire de moduler la dose et le type d'engrais apportée lors du premier surfaçage de façon à limiter les risques de lessivage qui y sont associés tout en permettant de stimuler la croissance.

Cette thématique de modulation des doses d'engrais et des dates du 1<sup>er</sup> surfaçage en fonction du stade des plantes a commencé à être étudiée au CATE depuis 2020 avec des premiers résultats intéressants. Ces essais ont été réalisés sur des cultures de *Myrtus communis* en conteneur de 7 litres sous abri non chauffé pour lesquelles on utilise la technique du rempotage directe avec 3 jeunes plants en petite alvéole (≈ 3cm). Avec cette technique, on est amené à diminuer la fertilisation au rempotage par rapport aux références habituelles pour éviter que les excès de salinité ne gênent l'enracinement des plantes. De ce fait, il se posait la question de savoir si d'avancer la date du 1<sup>er</sup> surfaçage par rapport aux références habituelles ne pouvait pas être une solution pour compenser cette diminution de la concentration d'engrais incorporée dans le substrat au rempotage.

Pour l'essai réalisé en 2021, la modalité dite « surfaçage modulé précoce » a été surfacée 60 jours après le rempotage avec l'engrais à libération programmée Osmocote Exact Standard 8-9 mois à 1 kg /m<sup>3</sup> (le 10/08/21) puis avec l'engrais de surfaçage Osmocote TopDress à 1,5 kg /m<sup>3</sup> (le 03/09/21). Pour la modalité dite « surfaçage modulé tardif », le 1<sup>er</sup> surfaçage a été réalisé 84 jours après le rempotage avec l'engrais à libération programmée Osmocote Exact Standard 8-9 mois à 1 kg /m<sup>3</sup> le 03/09/21 puis avec l'engrais de surfaçage Osmocote TopDress à 1,5 kg /m<sup>3</sup> le 21/09/21. La modalité non surfacée n'a bénéficié d'aucune fertilisation de complément. La richesse du substrat en nitrate a été mesurée par la méthode des percolats provoqués et le flux de nitrate présent dans la solution du substrat a été calculé (en mg de NO<sub>3</sub> /plante). Ces mesures sont présentées dans la figure n°17.

Ces mesures montrent que le « surfaçage modulé précoce » avec une concentration modérée (1 g/L) d'un engrais à libération programmée de 8-9 mois a permis de maintenir un niveau d'enrichissement du substrat en nitrate raisonnable (supérieur à 20 mg /Ctr et inférieur à 50 mg /Ctr) sur les mois d'août et septembre 2021 alors que pour la modalité « surfaçage modulé tardif », la quantité de nitrate disponible pour les plantes reste trop faible jusqu'au mois d'octobre 2021 (période où le potentiel de croissance diminue du fait du climat). Cette différence a influencé considérablement le rythme de croissance des plantes et l'élaboration de la qualité finale comme le montre les données du tableau n°8.

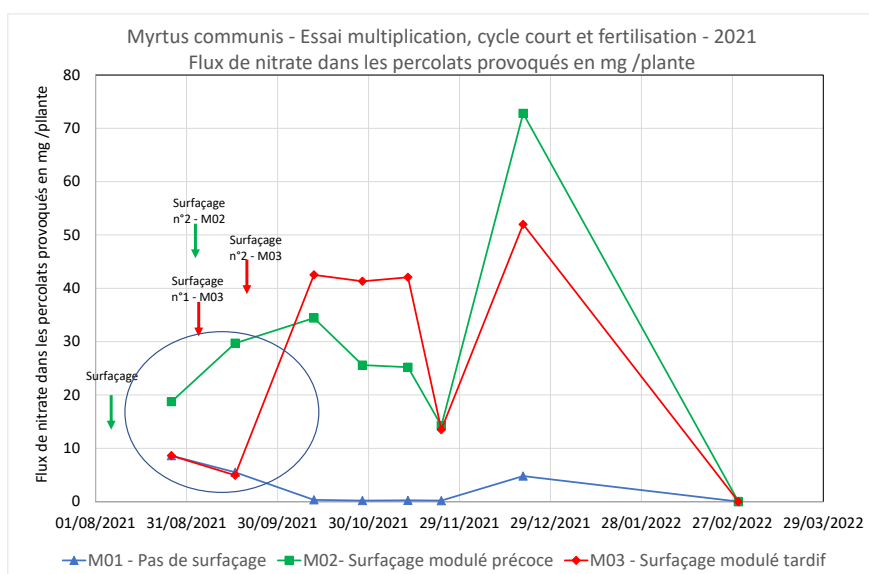


Figure 17 : Présence de nitrate dans le substrat mesurée par la technique des percolats provoqués et Nitrachek (exprimé en mg de NO3 disponible /plante). Essai CATE 2021 sur Myrtus communis en C7L. Rempotage : 11/06/2021. La fertilisation au rempotage est identique pour toutes les modalités (3 kg /m3 d'Osmocote Exact Standard 12-14 mois (15-9-11).

Modalité surfaçage modulé précoce : 1 surfaçage avec Osmocote Exact Standard 8-9 mois à 1 kg /m3 le 10/08/21 + 1 surfaçage avec Osmocote TopDress à 1,5 kg /m3 le 03/09/21. Modalité surfaçage modulé tardif : 1 surfaçage avec Osmocote Exact Standard 8-9 mois à 1 kg /m3 le 03/09/21 + 1 surfaçage avec Osmocote TopDress à 1,5 kg /m3 le 21/09/21. Pas de surfaçage : modalité non surfacée, sans aucune fertilisation de complément.

Essais 2021	Durée entre le rempotage et le 1er surfaçage (en jours)	Poids frais des parties aériennes en fin d'essai (g /plante)	% de plantes commercialisables en catégorie extra	% de plantes commercialisables en catégorie 1er choix	% de plantes en catégorie non commercialisable
Surfaçage modulé précoce	60	211	63	21	17
Surfaçage modulé tardif	84	212	39	30	31
Non surfacé		135	11	36	53

Tableau 8 : Poids frais des parties aériennes en fin d'essai (en g /plante) et % de plantes par catégories de qualité. Essai CATE 2021 sur Myrtus communis en C7L. Rempotage : 11/06/2021. Description des modalités : voir figure n°9.

La synthèse des 3 années d'essai sur cette thématique et pour des conditions de culture proches montrent que dans le contexte d'une culture modérément fertilisée au rempotage, la modulation de la dose et du type d'engrais lors d'un 1<sup>er</sup> surfaçage réalisé précocement après le rempotage a un impact très favorable sur la croissance des plantes et sur l'élaboration de la qualité. L'effet sur le % de plantes commercialisables de cette pratique est très favorable (Cf tableau n°9).

Moyenne des essais 2020-2022	Durée entre le rempotage et le 1er surfaçage (en jours)	Poids frais des parties aériennes en fin d'essai (g /plante)	% de plantes commercialisables en catégorie extra	% de plantes commercialisables en catégorie 1er choix	% de plantes en catégorie non commercialisable
Surfaçage modulé précoce	59	241	76	14	10
Surfaçage tardif	88	220	44	43	13
Non surfacé		205	6	45	49

Tableau 9 : Poids frais des parties aériennes en fin d'essai (en g /plante) et % de plantes par catégories de qualité. Synthèse des essais CATE 2020, 2021 et 2022 sur Myrtus communis en C7L.

Pour le moment, les répercussions environnementales de cette pratique de modulation des doses d'engrais par la mesure du lessivage des nitrates n'ont pas encore été évaluées. Mais, du fait d'un enrichissement maîtrisé du substrat en nitrate même si les plantes n'ont atteint qu'un niveau de croissance modéré au moment de la réalisation du 1<sup>er</sup> surfaçage, on peut supposer que l'effet sur le lessivage restera acceptable. De plus, on a observé par ailleurs que l'accélération précoce de la croissance qui permet une occupation plus rapide de l'ensemble du conteneur par les racines a pour arrière effet de limiter ensuite le lessivage en 2<sup>ème</sup> partie de culture. Cette situation semble préférable.

du point de vue des conséquences environnementales à une installation des plantes qui traîne en longueur avec des vitesses de croissance faible consécutive à un niveau de fertilité du substrat insuffisant. Cette hypothèse sera évaluée prochainement dans un dispositif d'expérimentation adéquate.

### **Mais des références obsolètes pour le conseil aux pépiniéristes et horticulteurs**

Les références françaises utilisées jusqu'à présent pour les conseils de fertilisation en pépinière sont anciennes et datent au mieux des années 90. Elles utilisent des raisonnements basés essentiellement sur les exportations globales en fin de culture (Lemaire et al., 1996) et sur l'utilisation de solutions nutritives. Les questions concernant les flux d'azote en cours de culture, l'évolution des besoins au fur et à mesure de la croissance (Lemaire et al., 1991) et les effets sur les impacts environnementaux (Charpentier, 1996) ne sont pas pris en compte dans les préconisations destinées aux producteurs (Lebrun, 1996 ; Joussemet, 1996). Il en est de même en Suisse (Carlen et al., 2017).

Par ailleurs, la diversité des espèces, des calendriers de culture et des itinéraires techniques est en grande partie ignorée. Des références hollandaises plus récentes sont utilisées mais elles concernent surtout les cultures réalisées sous serre et fertilisées par solutions nutritives. Toutefois, ces systèmes de cultures sont finalement peu présents ou très différents des systèmes utilisés en pépinière ornementale en France où les engrais à libération programmée sont majoritairement employés. Ainsi, on peut considérer qu'il n'existe pas de normes actualisées pour la re-fertilisation en cours de culture en pépinière ornementale hors-sol qui soit établies en fonction du statut azoté des plantes et des risques environnementaux.

Comme cela a été déjà précisé, le système de fertilisation majoritairement mis en œuvre en pépinière ornementale hors-sol en France repose sur la mise en œuvre des engrais à libération programmée. C'est devenu le système dominant de fertilisation pour cette filière depuis une vingtaine d'années. Ce système est également de plus en plus répandu en plantes fleuries. Avec ce système, une partie de la fertilisation est incorporée dans le substrat au moment du rempotage (50 à 70 %) et le reste est apporté en cours de culture sous la forme d'un ou plusieurs surfaçages.

### **Des connaissances renouvelées en grandes cultures et en cultures légumières comme source d'inspiration**

Parallèlement à cette situation, on observe dans d'autres filières, que ce soit en grandes cultures ou en production de légumes, de fortes évolutions des approches, des connaissances, des conseils et des pratiques de culture en matière de fertilisation.

Cette évolution est notamment basée sur :

- La prise en compte d'un indice de nutrition azotée (INN) construit à partir des courbes critiques de dilution de l'azote (relation entre la production de biomasse et la concentration en azote de la plante).
- L'analyse de sol et la mesure du stock d'azote dans le sol à une étape clé de la culture.
- Le suivi d'indicateurs concernant l'état azoté des plantes avec des outils de diagnostics comme la mesure de la teneur en nitrates de jus de base de tige en céréales, la concentration en nitrates de jus de pétiole de jeunes feuilles adultes pour différents légumes, la concentration en chlorophylle. Ces mesures sont mises en relation avec l'INN et servent à piloter les apports d'azote en cours de culture. On cherche pour cela à valoriser des données de capteurs ou de méthode d'analyse de l'état azoté des plantes en temps réels pour optimiser les apports d'engrais à la parcelle et à la culture, voire pour piloter la fertilisation azotée en limite de carence.

### **Les courbes critiques de dilution de l'azote et l'indice de nutrition azoté INN :**

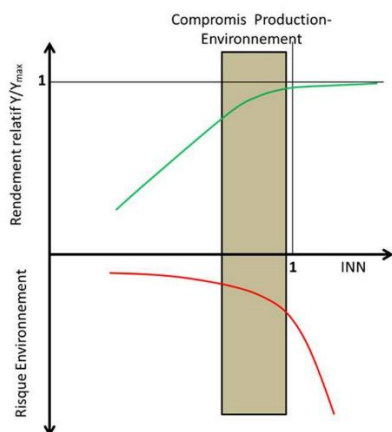
Les travaux réalisés par Lemaire et al. (1984) et Lemaire et Salette (1984) sur des graminées fourragères en condition d'offre en azote non limitante démontre l'existence d'une relation d'allométrie stable entre l'accumulation de matière sèche des plantes et leur concentration en azote. Cette relation se traduit par une diminution de la teneur en azote au cours de la croissance. En condition non limitante en azote, les prélèvements d'azote par la plante s'ajustent en fonction du potentiel de croissance fixé par les conditions climatiques. L'analyse des prélèvements d'azote en fonction du temps n'apparaît pas aussi pertinente que celle réalisée en fonction de la croissance.

L'existence de cette relation a été démontré sur plusieurs espèces et des courbes de dilution critique permettant d'identifier des situations de carence en azote ont été élaborées notamment sur blé (Justes et al. 1994) et Colza (Colnenne et al., 1999) mais aussi pour d'autres espèces comme le maïs, le pois, la pomme de terre, la betterave (cité par Recous et al., 2011). Pour Mary et Guérif (2005), le concept de courbe de dilution critique de l'azote permet donc de diagnostiquer l'état de nutrition azoté d'un peuplement végétal. A partir des courbes de dilution critique de l'azote, un index de nutrition azoté peut être défini. Il est calculé à partir du % d'azote d'une plante à un moment donné par

rapport à un % d'azote critique de référence (Lemaire et Meynard, 1997). Cet outil permet de déterminer des périodes de déficience en azote et d'identifier des périodes de sensibilités au manque d'azote.

Les travaux de Rahimikhood et coll. (2020) qui ont développé une courbe critique de dilution de l'azote pour la culture du basilic en conteneur, sont les seules références bibliographiques trouvées sur l'utilisation de ces principes en horticultures ornementale. Etonnement, Bracke et al. (2019a) et Bracke et al. (2019b) dans des travaux récents sur la fertilisation azotée du chrysanthème et de plusieurs arbustes ornementaux ne prend pas en considération cette approche.

Or, pour Lemaire (2020), l'INN produit à partir des courbes critiques de dilution de l'azote peut être considéré comme « un invariant » et comme « un indicateur de la capacité de la culture à satisfaire ses besoins en azote, mais aussi de la disponibilité globale de l'azote à circuler entre les composantes du système sol-plante-microbes, et donc des risques environnementaux afférents ».



Représentation de la réponse de la culture à l'état nutritionnel azoté de la culture (INN). Lemaire (2020)

### Les outils de diagnostics du statut azoté des cultures

Pour de nombreux auteurs, la connaissance de la disponibilité en azote du sol en grandes cultures n'est plus suffisante pour piloter la fertilisation. Un diagnostic du statut azoté des plantes est nécessaire pour préciser l'intensité du déficit de nutrition ou la sur-fertilisation d'une culture par rapport aux références établies avec les courbes critiques de dilution de l'azote (Lemaire, 2020).

Pour accéder plus facilement au statut azoté des cultures et détecter des carences ou des excès, des outils de diagnostic ont été développés par les agronomes, notamment en grandes cultures et en production légumières.

Justes et al. ont proposé d'utiliser la teneur en nitrates des jus extraits à la base des tiges pour déterminer si des apports d'azotes sont nécessaires en céréales. C'est sur cette méthode que repose l'outil Jubil®.

La méthode Pilazo, qui relève du même principe, a été développée par le CTIFL pour optimiser la fertilisation de différentes cultures légumières. Elle est basée sur la mesure de la concentration en nitrates des sucs pétiolaires de jeunes feuilles adultes en Fraise (Raynal-Lacroix et al., 2002), en carotte (Raynal-Lacroix, 2008), en Tomate (Erard et al., 2009), en chou-fleur (Raynal-Lacroix et al., 2007). Cette concentration sert ensuite à établir un indice de nutrition azoté (INN) pour lequel les courbes critiques de dilution de l'azote élaborées servent de référence.

D'autres techniques de diagnostic du niveau de nutrition azotée des plantes sont basés sur la mesure de la concentration en chlorophylle des feuilles. Des capteurs optiques sont utilisés à cet effet. Ce sont soit des capteurs de proximité (Greenseeker®) ou des pinces à feuilles (N-Tester®, Apogee MC100®), des capteurs embarqués sur des tracteurs (N-Sensor) ou des capteurs embarqués sur des drones ou des satellites (Farmstar®) qui sont utilisés pour moduler les doses d'engrais apportées lors des re-fertilisation en cours de culture et décider des dates des apports (Soenen, 2011).

Avec le capteur Dualex, la concentration en polyphénols est également mesurée en parallèle de la concentration en chlorophylle pour améliorer la précision du diagnostic. De nombreux travaux de recherche sont également mis en œuvre pour enrichir la palette d'indicateur utilisables et notamment des indicateurs de végétation (NDVI, NDRE....) ou des propriétés morphologiques des végétaux qui seraient mesurés par des capteurs.

En horticulture ornementale, certains outils de diagnostic ont déjà été testés. Desmotes-Mainard et al. (2008) ont montré que les mesures du Dualex® sont bien corrélées à la concentration en azote de jeunes feuilles sur *Lagerstromia*, *Callicarpa* et *Viburnum tinus*. De même, Bracke et al. (2019 b) confirme l'intérêt de ce capteur pour affiner la fertilisation sur *Acer*, *Ligustrum*, *Prunus laurocerasus* et *Tilia*. Bracke et al. (2019 b) souligne que la corrélation est améliorée lorsque la concentration en azote est exprimée en fonction de la surface de feuille (en g/m<sup>2</sup>) et en prenant en compte la LMA (Leaf Mass per Area).

Les conditions d'utilisation de ces méthodes en condition opérationnelle pour le pilotage des cultures restent toutefois à préciser.

### **Nécessité de piloter les surfaçages en pépinière et en horticulture ornementale**

On peut considérer que les données empiriques et les règles de décisions actuellement utilisées en horticulture et en pépinière en France ne sont plus suffisantes face aux exigences environnementales et commerciales. De nouvelles approches sont nécessaires et doivent être mises en œuvre en culture en conteneurs pour optimiser les apports d'engrais en cours de production de façon à mieux maîtriser la croissance, la qualité tout en limitant les fuites d'azote du système de culture.

Une première réflexion laisse penser qu'en culture en conteneurs (caractérisée par un faible volume de substrat et par l'utilisation d'engrais à libération programmée), l'optimisation de la fertilisation nécessite de tenir compte :

- De la quantité d'éléments fertilisants présente dans le substrat. Pour cet aspect, des méthodes d'analyse existent même s'il serait nécessaire de distinguer plus facilement les éléments fertilisants rapidement assimilables du stock disponible à moyen terme. Par contre, il n'apparaît pas nécessaire de prendre en compte la minéralisation de l'azote organique lorsqu'aucune fertilisation organique n'est utilisée.
- De la vitesse de croissance des végétaux.
- Mais également de l'état azoté de la plante. Or, on ne dispose pas pour le moment d'outils opérationnels permettant de préciser cet état pour les plantes en conteneurs.

### **Mesure du statut azoté des arbustes**

Des premiers essais pour mettre en relation le statut azoté des plantes et leur croissance ont été réalisés à la station en 2022. Ces essais ont été réalisés sur *Viburnum tinus* en conteneur de 4 litres (rempotage à partir de jeunes en godet) et sur *Myrtus communis* en conteneur de 7 litres (rempotage à partir de 3 jeunes plants en alvéoles de 3 cm). Les essais mis en place ont consisté à comparer différentes pratiques de surfaçage visant à influencer la concentration en azote des plantes cultivées. Des modalités avec une fertilisation limitante (absence de surfaçage) et au contraire, non limitante ont été introduites dans les dispositifs expérimentaux.

Dans ces essais, la méthode de référence utilisée pour mesurer la concentration en azote des plantes (% N) qui correspond à ce qui est appelé le statut azoté, est la méthode de Dumas. Les échantillons de plantes analysés sont les parties jeunes et faiblement lignifiées des arbustes (pas les troncs ni les vieilles branches).

La figure n°18 représente l'évolution de la concentration en azote des plantes en fonction de l'évolution du poids frais des parties aériennes pour différents niveaux de nutrition azotée et pour l'essai réalisé sur *Myrtus communis* en C7L.

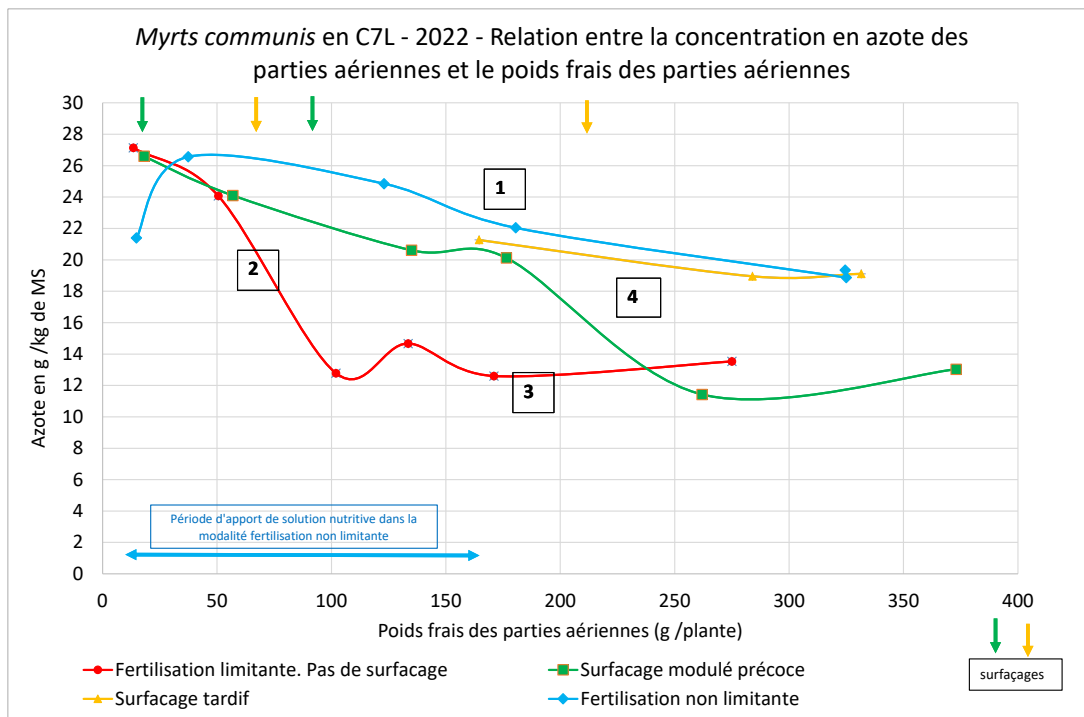


Figure 18 : Relation entre la concentration en azote des parties aériennes et le poids frais des parties aériennes. Essai CATE 2022 sur *Myrtus communis* en C7L. Rempotage : 08/04/2022. La fertilisation au rempotage est identique pour toutes les modalités (3 kg /m<sup>3</sup> d'Osmocote Exact Standard 12-14 mois (15-9-11).

Modalité surfacage modulé précoce : 1 surfacage avec Osmocote Exact Standard 8-9 mois à 1 kg /m<sup>3</sup> le 23/06/22 puis 1 surfacage avec un mélange Osmocote Exact Standard 8-9 mois (50 %) + Osmocote TopDress (50%) à 1,5 kg /m<sup>3</sup> le 03/08/22. Modalité surfacage tardif : 2 surfacages avec un mélange Osmocote Exact Standard 8-9 mois (50 %) + Osmocote TopDress(50%) à 1,5 kg /m<sup>3</sup> les 03/08/22 et 12/09/22. Pas de surfacage : modalité non surfacée, sans aucune fertilisation de complément. Fertilisation non limitante : apport de solution nutritive du 20/06/22 au 31/08/22.

Cette figure permet d'illustrer plusieurs situations différentes :

- (1) Courbe de dilution de l'azote dans une situation de fourniture non limitante ou peu limitante en azote (sauf après le 15/07 du fait de l'arrêt des apports de solution nutritive.
- (2) Situation de fertilisation limitante en azote du fait de l'absence de surfacage entraînant une baisse brutale du % d'N dans les plantes.
- (3) Après cette forte dilution, la concentration en azote atteint un niveau minimum qui se maintient en plateau. Les engrais à libération programmée utilisé au rempotage continuent de fournir un minimum d'azote et évite d'aboutir à une carence complète.
- (4) Pour la modalité en surfacage modulé précoce, la fourniture d'azote est non limitante au départ puis devient insuffisante et un phénomène de dilution accéléré se développe lorsque le poids frais des parties aériennes dépasse 150 à 200 g/plante. Les engrais à libération programmée utilisé au rempotage et en surfacage continuent à fournir un minimum d'azote pour éviter la carence. Pour la modalité surfacage tardif, les surfacages permettent de maintenir le statut azoté des plantes en situation peu limitante.

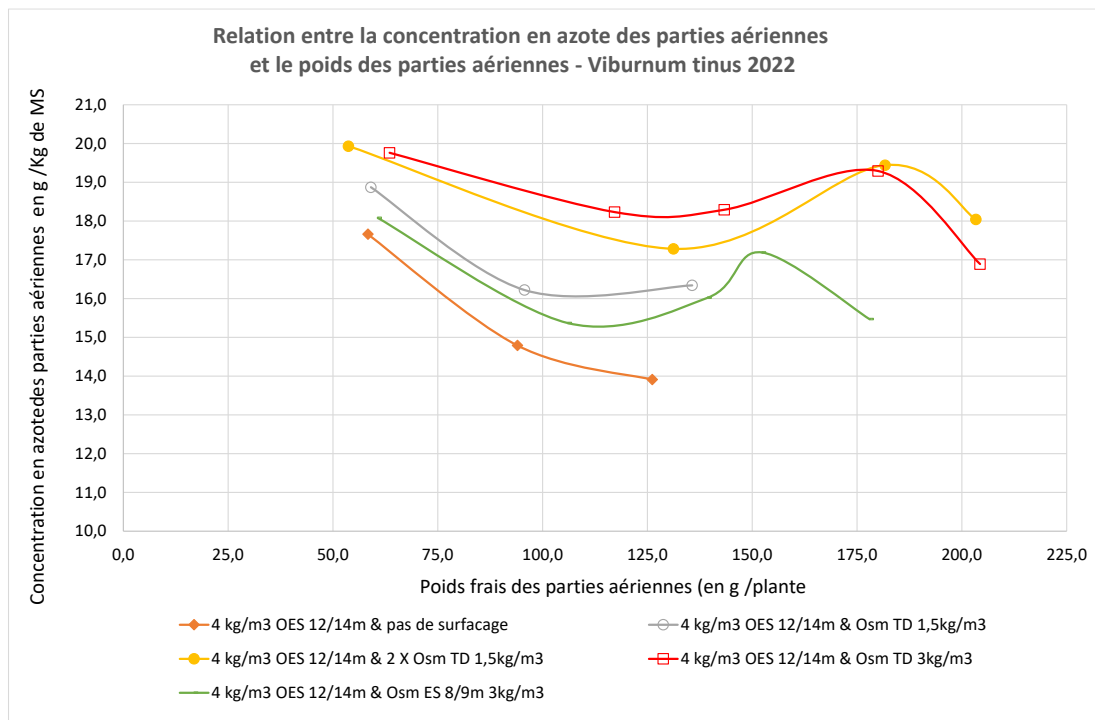


Figure 19 : Relation entre la concentration en azote des parties aériennes et le poids frais des parties aériennes. Essai CATE 2022 sur *Viburnum tinus* en C7L. Rempotage : 18/01/2022. La fertilisation au rempotage est identique pour toutes les modalités (4 kg /m<sup>3</sup> d'Osmocote Exact Standard 12-14 mois (15-9-11)). Seules les pratiques de surfacages sont différentes entre les modalités.

On retrouve également pour *Viburnum tinus* en C4L des profils caractéristiques lié au fait que la culture est sous fertilisée ou au contraire fertilisée à un niveau satisfaisant (Figure n°19). Pour cette espèce, les seuils de concentration en azote des tissus jeunes pourraient approximativement définis comme les suivants :

- en situation de nutrition normale, le % d'N des parties aériennes jeunes est supérieur à 18 g /kg de MS.
- en situation de carence, le % d'N des parties aériennes jeunes est inférieur à 15 g /kg de MS. A ce niveau, la croissance est très fortement affectée.
- entre 15 et 18 g d'N /kg de MS, la croissance est ralentie.

Cette démarche semble très intéressante puisque des profils assez caractéristiques peuvent être observés selon que les plantes sont fertilisées en excès ou de façon limitante en azote. L'étude de cette démarche sera poursuivie de façon à enrichir les outils de pilotage de la fertilisation avec une méthode permettant d'estimer le statut azoté des plantes.

Toutefois, la mesure de la concentration en azote totale des plantes par la méthode de Dumas étant destructive et réalisée en laboratoire avec une temps de réponse relativement long, d'autres méthodes de mesure doivent être testées pour évaluer rapidement et sur site le contenu en azote des plantes. Deux méthodes d'analyse ont commencé à être travaillées à la station sur les arbustes :

- Il s'agit d'une part de la concentration en nitrate des jus extraits des entrenœuds apicaux (dite jus de pétiole). Pour cela, une phase de mise au point a permis d'élaborer la méthode, de définir les organes à prélever et la taille des échantillons à analyser pour extraire la sève et déterminer sa concentration en nitrate par Nitrachek.
- Et d'autre part, la mesure de la concentration en chlorophylle des feuilles par un appareil portable a également commencé à être étudiée.

Ces essais sont en cours.

## 7. Conclusion

Les expérimentations réalisées en pépinière hors-sol à la station du CATE entre 2010 et 2022 ont permis de mesurer la dynamique du lessivage des nitrates de cultures d'arbustes fertilisées par des engrais à libération programmée. Au cours du processus de lessivage, plusieurs phases sont observées dont l'intensité et le calendrier varient en fonction de différents facteurs de production tel que le programme de fertilisation ou la pratique de l'irrigation. Les caractéristiques du substrat interviennent également mais dans une moindre mesure. Ces résultats montrent que la prise en compte du

système de culture dans sa globalité et des interactions entre les facteurs de production sont essentiels pour mieux maîtriser le lessivage.

Par ailleurs, le rôle de la fertilisation de complément réalisée en cours de culture dans le risque de lessivage commence à être compris et mieux décrit. Mais, parallèlement, la pratique de la fertilisation de complément en cours de culture joue un rôle essentiel sur la qualité des végétaux produits et donc sur la rentabilité du système de culture. Plusieurs leviers ont été proposés et étudiés pour limiter le risque de lessivage associé à la technique de surfaçage tout en permettant d'aboutir à un haut niveau de qualité de la production. Il s'agit en premier lieu du fractionnement des doses d'engrais dont les résultats sont validés et probants pour diminuer le lessivage des nitrates. Un deuxième levier a commencé à être étudié et semble prometteur. Il s'agit de la modulation de la dose d'engrais et de la date du premier surfaçage. Mais, l'utilisation de ce levier doit encore être validée. Il est apparu que l'efficacité de ce levier sera liée à la prise en compte de la capacité d'absorption des nitrates par la plante qui est associée à sa vitesse de croissance au moment du surfaçage. Ce facteur est apparu comme un élément central du fonctionnement du système qui régule la quantité de nitrate dans le substrat et participe très activement à la limitation du risque de lessivage des nitrates. Pour optimiser les surfaçages en fonction de ces nouvelles connaissances, il est devenu nécessaire de proposer de nouveaux outils de pilotage de la fertilisation qui tiennent compte à la fois du niveau de fertilité du substrat, du statut azoté des plantes et de leur dynamique de croissance afin de limiter le plus possible le lessivage des nitrates sans pénaliser la croissance et la qualité des végétaux. Ces outils ont commencé à être étudiés mais les connaissances pour les développer en production sont encore insuffisantes.

Ces travaux expérimentaux montrent que la mise en œuvre d'évaluations environnementales objectives associées à l'expertise agronomique et à la connaissance du système de culture permette d'élaborer de nouveaux itinéraires techniques à la fois performant et plus durables.

#### **Références bibliographiques :**

- Addiscott T.M. (1990). Measurement of nitrate leaching : a review of méthode. International Symposium Nitrates-Agriculture-Eau. 7&8-11-90. Ed. INRA.
- Alam M.Z., Chong C., Llewellyn J., Lumis G.P. (2009) : Evaluating fertilization and water practices to minimize NO<sub>3</sub>-N leachate from container grown Forsythia. Hortscience, 44(7): 1833-1837.
- Billderback T.E. (2002). Water management is key to reducing nutrient runoff from conteneur nursery. Horttechnology, 12:541-544.
- Bracke, J., Elsen, A., Adriaenssens, S., Vandendriessche, H., & Van Labeke, M. C. (2019 a). Utility of proximal plant sensors to support nitrogen fertilization in Chrysanthemum. Scientia Horticulturae, 256, 108544.
- Bracke, J., Elsen, A., Adriaenssens, S., Schoeters, L., Vandendriessche, H., & Van Labeke, M. C. (2019 b). Application of proximal optical sensors to fine-tune nitrogen fertilization: Opportunities for woody ornamentals. Agronomy, 9(7), 408.
- Cabrera R.I., Evans R.Y. Paul J.L. (1993) : Leaching losses of nitrogen from container-grown roses. Scientia Horticulturae, 53 : 333-345.
- Carlen C., Gilli C., Poffet J., Wegmüller H.P., 2017. Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse. 16/ La fertilisation des plantes ornementales et des arbustes, pp. 16/1 – 16/12.
- Charpentier S., 1996. Impact de la fertilisation sur l'environnement. In : La fertilisation en pépinière. IFHP – Reshor, Réf : IFHP 96.02, pp. : 141-148.
- Colnenne C., Meynard J.M., 1999. The Critical Nitrogen Curve for winter oilseed rape : determination and use as a diagnostic tool for crop nitrogen status. 10. International Rapeseed Congress. <http://www.regional.org.au/au/gcirc/2/265.htm>
- Demotes-Mainard, S., Boumaza, R., Meyer, S., & Cerovic, Z. G. (2008). Indicators of nitrogen status for ornamental woody plants based on optical measurements of leaf epidermal polyphenol and chlorophyll contents. Scientia Horticulturae, 115(4), 377-385.
- Harris G.L., Hodgkinson R.A., Scott M., Mason D.J., Pepper T.J. (1997) : Impact of hardy ornamental nursery stock(HONS) systems on the environment : losses of nutrients and agrochemicals. Agricultural Water Management, 34 : 95-110.
- Joussemet M.A., 1996. Fertilisation et résistance au froid d'une culture en conteneur. In : La fertilisation en pépinière. IFHP – Reshor, Réf : IFHP 96.02, pp. : 118-128.

- Justes E., Mary B., Meynard J.M., Machet J.M., Thelier-Huche L., 1994. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. *Annals of Botany*, 74, 397-407.
- Justes, E., Meynard, J. M., Mary, B., & Plenet, D. (1997). Diagnosis using stem base extract: JUBIL method. *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, 163-187.
- Lebrun D., 1996. Les programmes de fertilisation en pépinière d'ornement hors-sol dans les pays de la Loire. In : La fertilisation en pépinière. IFHP – Reshor, Réf : IFHP 96.02, pp. : 97-104.
- Lemaire, F., Dartigues A., Rivière L.M., Charpentier S., 1989. Cultures en pots et conteneurs. Principes agronomiques et applications. Ed. INRA. 178 pages.
- Lemaire F., Da Costa L., Michelot P., Joussemet M.A., 1996. Evaluation des besoins minéraux des plantes ligneuses ornementales : arbustes, tiges pendant la culture et pendant la période d'hivernage. In : La fertilisation en pépinière. IFHP – Reshor, Réf : IFHP 96.02, pp. : 27-35.
- Lemaire G., 2020. Fertilisation des cultures : des bases scientifiques renouvelées. [https://mots-agronomie.inra.fr/index.php/Fertilisation\\_des\\_cultures:\\_des\\_bases\\_scientifiques\\_renouvelées](https://mots-agronomie.inra.fr/index.php/Fertilisation_des_cultures:_des_bases_scientifiques_renouvelées).
- Lemaire G., Meynard J.M., 1997. Use of Nitrogen Nutrition Index for the analysis of agronomical data. In : *Diagnosis of the nitrogen status in crop*. G. Lemaire (Ed). Springer. P.45-55.
- Lemaire G.G., Salette J., Sigogne M., Terrasson J.P., 1984. Relation entre dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères.I. – Etude de l'effet du milieu. *Agronomie*, 4(5), pp.423-430.
- Lemaire G.G., Salette J., 1984. Relation entre dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. II. – Etude de la variabilité entre génotype. *Agronomie*, 4(5), pp.423-430.
- Mary B., Guéris M., 2005. Effet du stress azote sur la plante : Définition d'un indice de nutrition instantané. INRA. Séminaire STICS, Carry le Rouet, 17-18 mars 2005, p. 23-30.
- Mary L. (2012) : La fertilisation par les engrais à libération programmée en pépinière hors-sol. Aujourd'hui et demain, N°113, novembre 2012, p. 19-23.
- Mary L. (2014) : Limitation du lessivage des éléments fertilisants en pépinière ornementale hors-sol. Compte rendu d'expérimentation Astredhor. <http://www.astredhor.fr/>
- Mary L. (2015) : Optimisation des conduites et itinéraires alternatifs en pépinière ornementale hors-sol pour limiter les impacts environnementaux - Limitation du lessivage des éléments fertilisants. Compte rendu d'expérimentation Astredhor. <http://www.astredhor.fr/>
- Mary L. (2016) : Optimisation des conduites et itinéraires alternatifs en pépinière ornementale hors-sol pour limiter les impacts environnementaux - Limitation du lessivage des éléments fertilisants. Compte rendu d'expérimentation Astredhor. <http://www.astredhor.fr/>
- Matsyak B., Nogowska A. (2016) : Impact of fertilization strategies on the growth of lavender and nitrates leaching to environment. *Hort.Sci.(Prague)*, 43(2) : 76-83.
- Matysiak B. (2015) : Growth response of container grown Japanese azalea and euonymus and concentration of nitrates and phosphates in the runoff water under different irrigation and fertilization. *Journal of Horticultural research*, 23(1):21-32.
- Milion J., Yeager T., Albano J. (2007) : Consequences of excessive overhead irrigation on runoff from during container production of sweet Viburnum. *Journal of Environmental Horticulture*: 25(3)117-125.
- 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.
- Rahimikhoob H., Sohrabi T., Delshad M., 2020. Development of a critical nitrogen dilution curve for Basil (*Ocimum basilicum* L.) under greenhouse conditions. *Journal of Soil Sciences and Plant Nutrition*, 20:881-891.
- Raynal-Lacroix, C., Abarza E., 2002. La fertilisation du fraisier – Pilazo : une méthode de gestion raisonnée de l'azote. *Infos-CTIFL*, n°180, 36-39.
- Raynal-Lacroix, C., Porteneuve C., 2007. La fertilisation azotée du chou-fleur d'hiver. *Infos-CTIFL*, n°235, 41-46.
- Raynal-Lacroix, C., 2008. La fertilisation de la carotte d'hiver – La méthode Pilazo, outil de gestion. *Infos-CTIFL*, n°247, 37-41.
- Raynal-Lacroix, C., Crestin J.M. 2009. La fertilisation de la tomate en sol – Mise au point d'une méthode de gestion. *Infos-CTIFL*, n°253, 40-45.
- Raynal-Lacroix C., Soing P., Verpont F. (2006). L'azote issu de la minéralisation des produits organiques et du sol. Quels sont les moyens d'évaluation ?. *Infos-Ctifl*, 226, 33-41.

Recous S., Machet J.M., Jeuffroy M.H., 2011. Les connaissances nouvelles sur le cycle de l'azote: en quoi et comment ont-elles été intégrées (ou pas) dans les OAD pour la fertilisation azotée ?. 3<sup>ème</sup> Journée de Prospective du RMT Fertilisation and Environnement, RMT "Fertilisation et Environnement". Jan 2011, Paris, France. 25 p. ffhal-01000008

Yegar T., Million J., Larsen C., Stamps B. (2010) : Florida Nursery Best Management Practices : past, present and future. HorTechnology, 20(1), 82-88.

## Annexe 1 : Liste des expérimentations mises en œuvre au CATE de 2010 à 2022 sur la thématique du lessivage des nitrates en pépinière hors-sol.

### Liste des essais portant sur la maîtrise du lessivage des nitrates et l'optimisation de la fertilisation réalisés au CATE à partir de 2010

N° d'essai	Année d'essai	Thématique des essais	Espèce	Litrage des conten- eurs	Jeune plant	Conditions de culture	Début essai	Fin essai	Fertilisation au rempotage	Fertilisation de complément	Remarques
1	2010	Interaction substrat - fertilisation	Escallonia 'iveyi'	C4L	godet	Rempotage sous abri & sortie au printemps	10/12/2009	03/11/2010	Osmocote Exact Standard 8-9 mois à 4 kg /m3	Osmocote Exact Standard 8-9 mois à 3 kg/m3	
2	2011	Interaction substrat (% de tourbe) - fertilisation & améliorateur de CEC	Escallonia 'iveyi'	C4L	godet	Rempotage sous abri & sortie au printemps	26/01/2011	14/10/2011	Osmocote Exact Standard 12-14 mois à 4 kg /m3	Osmocote Exact Standard 8-9 mois à 3 kg/m3	
3	2012	Interaction substrat (% de tourbe) - fertilisation (marques, durée, dose) & améliorateur de CEC	Escallonia 'iveyi'	C4L	godet	Rempotage sous abri & sortie au printemps	12/01/2012	15/12/2012	plusieurs modalités	plusieurs modalités	
4	2013	Effet de différents programmes de fertilisation + 4 autres espèces	Escallonia 'iveyi'	C4L	godet	Rempotage sous abri & sortie au printemps	28/02/2013	15/11/2013	plusieurs modalités	plusieurs modalités	Cupressocyparis leylandii, Azalea japonica, Rhododendron, Ceanothus thyrsiflorus
5	2014	Effet de différents programmes de fertilisation	Escallonia 'iveyi'	C4L	godet	Rempotage sous abri & sortie au printemps	15/01/2014	20/11/2014	plusieurs modalités	plusieurs modalités	
6	2015	Effet de pilotage de l'irrigation	Escallonia 'iveyi'	C4L	godet	Rempotage sous abri & sortie au printemps	20/01/2015	10/11/2015	Osmocote Exact Standard 12-14 mois à 4 kg /m3	Osmocote TopDress à 3 kg /m3	
7	2016	Effet de pilotage de l'irrigation & surfaçage	Escallonia 'iveyi'	C4L	godet	Rempotage sous abri & sortie au printemps	22/01/2016	10/11/2016	Osmocote Exact Standard 12-14 mois à 4 kg /m3	plusieurs modalités	
8	2017	Effet de pilotage de l'irrigation & surfaçage	Myrtus communis	C4L	godet	Rempotage sous abri & sortie au printemps	16/02/2017	29/10/2017	Osmocote Exact Standard 12-14 mois à 4 kg /m3	plusieurs modalités	
9	2018	Effet des espèces et du systèmes de culture sur le lessivage	Azalée japonaise, Rhododendron, Camelia japonica, Viburnum tinus	C3L, C4L, C7L	Selon espèces	Itinéraire fonction des espèces		01/10/2018	Fonction des espèces	Fonction des espèces	
10	2019	Effet sur le lessivage de la date de rempotage et de l'itinéraire de culture pour une espèce	Viburnum tinus	C4L	godet	Différents itinéraires	01/02/2019, 15/04/19	28/10/2019	Osmocote Exact Standard 12-14 mois à 4 kg /m3	2 fois Osmocote TopDress à 1,5 kg /m3	1ère mesure vitesse de croissance et relation avec lessivage
11	2020	Effets de différentes pratiques de surfaçages (effets fractionnement & date de surfaçage)	Viburnum tinus	C4L	godet	Rempotage sous abri & sortie au printemps pr remp. janvier; à l'extérieur pr remp. Avril	30/01/2020, 08/04/20	15/10/2020	Osmocote Exact Standard 12-14 mois à 4 kg /m3	plusieurs modalités	Mesure vitesse de croissance et relation vitesse de croissance avec lessivage
12	2021	Effets de différentes pratiques de surfaçages (effets fractionnement & date de surfaçage)	Viburnum tinus	C4L	godet	Rempotage sous abri & sortie au printemps	02/02/2021	27/10/2021	Osmocote Exact Standard 12-14 mois à 4 kg /m3	plusieurs modalités dont fractionnement et modalité non surfacée	Mesure vitesse de croissance et relation vitesse de croissance avec lessivage. Introduction modalités ferti limitante et non limitante dans dispositif.
13	2022	Effets de différents programmes de fertilisation au rempotage et en surfaçages (effets fractionnement) et outils de pilotage de la fertilisation de complément.	Viburnum tinus	C4L	godet	Rempotage sous abri & sortie au printemps	18/01/2022	08/12/2022	Osmocote Exact Standard 12-14 mois à 3, 4 ou 5 kg /m3	plusieurs modalités dont fractionnement et modalité non surfacée	Mesure vitesse de croissance et relation vitesse de croissance avec lessivage. Introduction modalités ferti limitante et mesure % dN. Test d'outils de pilotage
14	2023	Effets de différents programmes de fertilisation au rempotage (DCT) et en surfaçages (effets fractionnement) et outils de pilotage de la fertilisation de complément.	Viburnum tinus	C4L	godet	Rempotage sous abri & sortie au printemps	14/02/2023	30/10/2023	Osmocote Exact Standard 12-14 mois à 4 kg /m3 (+ DCT)	plusieurs modalités dont fractionnement, dose modulée et modalité non surfacée	Mesure vitesse de croissance et relation vitesse de croissance avec lessivage. Introduction modalités ferti limitante et mesure % dN. Test d'outils de pilotage
15	2020	Essai pratique des surfaçages pour production de C7L en cycle court (dates et doses de surfaçage - surfaçages modulés)	Myrtus, Leptospermum	C7L	3 alvéoles	Culture sous abris	15/06/20	15/04/2021	Osmocote Exact Standard 12-14 mois à 3 kg /m3	plusieurs modalités avec fractionnement et dose modulée	
16	2021	Essai pratique des surfaçages pour production de C7L en cycle court (dates et doses de surfaçage - surfaçages modulés)	Myrtus	C7L	3 alvéoles	Culture sous abris	11/06/2021	15/05/2022	Osmocote Exact Standard 12-14 mois à 3 kg /m3	plusieurs modalités avec fractionnement et dose modulée & moda non surfacée	Mesure vitesse de croissance, NO3 du substrat. mesure % dN. Test d'outils de pilotage (chlorophylle)
17	2022	Essai pratique des surfaçages pour production de C7L en cycle court (dates et doses de surfaçage - surfaçages modulés)	Myrtus	C7L	3 alvéoles	Culture sous abris	10/04/2022	15/04/2023	Osmocote Exact Standard 12-14 mois à 3 kg /m3	plusieurs modalités avec fractionnement et dose modulée & moda non surfacée ou ferti non limitante	Mesure vitesse de croissance, NO3 du substrat. mesure % dN. Test d'outils de pilotage (chlorophylle, jus pétiole). Introduction modalités ferti limitante & non limitante.
18	2023	Essai pratique des surfaçages pour production de C7L en cycle court (dates et doses de surfaçage - surfaçages modulés) + optimisation irrigation	Myrtus	C7L	3 alvéoles	Culture sous abris	15/05/2023	15/11/2023	Osmocote Exact Standard 12-14 mois à 3 kg /m3	plusieurs modalités avec fractionnement et dose modulée & moda non surfacée ou ferti non limitante	Mesure vitesse de croissance, NO3 du substrat. mesure % dN. Test d'outils de pilotage (chlorophylle, jus pétiole). Introduction modalités ferti limitante & non limitante.