



# Projet Casdar Racin' Air

## Compte rendu du projet

**Rapport final**

Avec  
la contribution  
financière du compte  
d'affectation spéciale  
développement  
agricole et rural  
CASDAR

  
**MINISTÈRE  
DE L'AGRICULTURE  
ET DE LA SOUVERAINETÉ  
ALIMENTAIRE**  
*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**31/12/2025**

## Sommaire

	Page
I. Objectifs du projet	3
II. Présentation de la situation actuelle– Etat des connaissances sur la problématique	3
III. Les enjeux auxquels répond le projet	8
IV. Programme d’action	13
V. Résultats et discussion – travaux réalisés	18
Action 1 : Mise au point d’unités pilotes pour réaliser le bouturage par aéroponie à grande échelle	18
Tâche 1.1. : <i>Co-conception de dispositifs pilotes.</i>	18
Tâche 1.2. : <i>Construction de dispositifs pilotes pour une production à grande échelle</i>	23
1.2.1 : <i>Dispositif pilote du CATE</i>	23
1.2.2 : <i>Dispositif pilote de PLFP</i>	24
1.2.3 : <i>Dispositif pilote au CDHRC</i>	26
1.2.4 : <i>mise au point de procédés pour l’insertion et la récoltes des boutures</i>	28
Tâche 1.3. : <i>Evaluation du dispositif pilote et de l’itinéraire de bouturage.</i>	34
1.3.1. Ergonomie des procédés d’insertion et de récolte des boutures et intégration au dispositif d’aéroponie	38
1.3.2 Fonctionnement de la table de bouturage	37
1.3.3 Fonctionnement du module de traitement de l’eau et des équipements de régulation.	39
1.3.4. Consommation d’intrants par le dispositif d’aéroponie du CATE	41
1.3.5. Comportement de différents taxons lors du bouturage par aéroponie et réussite du bouturage	42
Action 2 : Transfert du procédé, des méthodes et du matériel végétal produit en conditions de production et élargissement à la filière PPAM	48
Tâche 2.1 : <i>transfert des boutures produites en condition de production</i>	48
Tâche 2.2 : <i>Installation d’unités pilotes chez des multiplicateurs et des producteurs</i>	49
Tâche 2.3 : <i>Elargissement de la technique à la filière PPAM</i>	49
Action 3 : analyse économique et acceptabilité du procédé	53
Tâche 3.1 : <i>Etude de la viabilité économique et de la durabilité d’une production industrielle de jeunes plants par aéroponie.</i>	53
a) Objectif	53
b) Méthodologie de l’étude	53
c) Principaux résultats de l’analyse économique	54
3.1.1 – Caractéristiques des dispositifs d’aéroponie	54
3.1.2 – Frais de fonctionnement des dispositifs d’aéroponie	55
3.1.3 – Coûts de main d’œuvre	55
3.1.4 – Total des charges opérationnelles et de main d’œuvre liées à la production de plants en aéroponie	56
3.1.5 – Autres facteurs de variation des charges opérationnelles et de main-d’œuvre	57
Tâche 3.2 : <i>Etude de l’acceptabilité de l’innovation et de ces retombées socio-économiques</i>	60
3.2.1. Etat des lieux de la filière jeune plant française	60
3.2.2. Stratégie d’approvisionnement en jeunes plants des producteurs français	62
3.2.3. Acceptabilité de l’aéroponie pour les cibles d’utilisateurs potentielles	67
VI. Conclusion	68



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

## PROJET RACIN'AIR COMPTE RENDU DU PROJET

### I. Objectifs du projet

L'objectif du projet est de développer une nouvelle méthode de multiplication des plantes, le bouturage par aéroponie. Cette technique pourrait se substituer au bouturage sur substrat qui est la technique de multiplication végétative de référence utilisée en horticulture ornementale et dans plusieurs autres filières végétales comme celles des PPAM, des petits fruits ou du houblon.

En effet, le bouturage sur substrat impose une phase d'enracinement en condition humide qui peut être longue avec les conditions de multiplication mises en œuvre par les multiplicateurs français. Ces conditions accroissent fortement les risques sanitaires, l'utilisation de produits phytosanitaires et d'intrants. Le bouturage par aéroponie est en mesure de limiter fortement ces difficultés tout en accélérant l'enracinement comme le montrent les résultats très prometteurs du projet FAM X-Aéroponie.

A travers ce projet, il s'agit de :

- 1- **Réduire le recours aux produits phytosanitaires, aux intrants et faciliter l'intégration environnementale** des multiplicateurs français.
- 2- **Renforcer la compétitivité** des filières françaises de production de plantes ornementales, plantes à parfum et médicinales par une meilleure maîtrise de la multiplication des jeunes plants.
- 3- **Relocaliser en France la production de jeunes plants pour les productions de plantes d'intérieur et de plantes à massif** qui dépendent massivement de l'étranger.
- 4- Faciliter le développement en France de filières naissantes comme celle de la production de petits fruits, de houblons grâce à **un approvisionnement satisfaisant en jeunes plants de qualité.**

**Pour cela, il est nécessaire de transposer à l'échelle industrielle le bouturage par aéroponie et assurer le transfert de la méthode aux multiplicateurs et aux producteurs français.** A cette fin, une démarche de co-innovation aboutissant à l'étude d'un dispositif pilote pour développer le procédé à l'échelle industrielle est proposée ainsi qu'une étude économique et sociologique pour préciser l'acceptabilité de cette technique.

**Il est également nécessaire de transférer la méthode à d'autres filières françaises faisant face aux mêmes difficultés de bouturage.** A cette fin, les techniques mises au point dans la filière horticole dans le cadre du projet X-Aéroponie seront testées sur des espèces difficiles à bouturer de la filière PPAM (lavande fine et thym).

### II. Présentation de la situation actuelle– Etat des connaissances sur la problématique

- ❖ **Une évolution préoccupante du secteur de la multiplication en France, un secteur pourtant stratégique pour les filières horticoles et PPAM ainsi que pour d'autres filières en développement.**

La filière horticole française compte 3 308 horticulteurs et pépiniéristes, 18 200 emplois, 15 000 hectares de production et un chiffre d'affaires de 1,2 milliard d'euros qui approvisionnent 20 000 entreprises de distribution et de commercialisation et 28 000 entreprises du paysage (France AgriMer, 2017).

Le secteur de la multiplication pour la pépinière ornementale représente en France un marché de 53 millions d'euros de chiffre d'affaires (FNPHP, 2019-2020). Ce secteur est stratégique pour l'ensemble de la filière française car il est un fournisseur indispensable. Or, l'activité française de multiplication pour la pépinière

ornementale subit une érosion lente d'année en année avec une disparition progressive d'entreprises (130 entreprises en 2017, 117 en 2019).

Si la production nationale de jeunes plants de pépinières reste pour le moment prédominante par rapport aux jeunes plants importés et si la majorité des jeunes plants nécessaires aux pépiniéristes éleveurs est d'origine française, on observe depuis plusieurs années l'intervention de multiplicateurs étrangers avec une offre très qualitative de jeunes plants qui concurrence fortement les multiplicateurs français.

Par contre, pour les plantes d'intérieur et à massif, les entreprises françaises de multiplication ont quasiment toutes disparues (45 entreprises françaises en 2019) et cette activité a été très largement déléguée à des fournisseurs étrangers. Cette perte d'autonomie n'est pas sans conséquence pour les horticulteurs français qui ne maîtrisent plus leurs gammes de variétés et leurs calendriers de production.

Le taux de couverture (exportation / importation x100) pour le secteur des jeunes plants ornementaux est passé de 153 % en 1997 à 48 % 2007 (Widehem et collaborateur, 2009) et a continué de se dégrader depuis (C. Widehem, communication personnelle).

Par ailleurs, la qualité des jeunes plants utilisés en horticulture détermine une part importante de la qualité du produit final et impacte aussi les coûts de production en dehors du coût propre des jeunes plants par des effets sur l'organisation des chantiers de rempotage, sur le nombre d'opérations culturales à réaliser lors de l'élevage des végétaux, sur le taux de réussite et l'homogénéité des lots, sur l'état sanitaire des cultures ....

Une prise en considération de l'évolution de ce secteur d'activité est nécessaire. En effet, la mainmise des multiplicateurs étrangers sur le marché français entraînera non seulement l'affaiblissement du secteur de la multiplication nationale, mais aboutira aussi à une fragilisation de l'ensemble de la filière avec l'intensification d'une situation concurrentielle défavorable. Cette situation ne sera pas sans conséquence pour l'avenir (limitation de l'accès à la diversité végétale par exemple). Les possibilités d'approvisionnement en végétaux pour la distribution doivent aussi être maintenues.

Il s'agit donc d'éviter en pépinière ce qui s'est passé en fleurs coupées et ce qui se passe pour la plante en pot : disparition ou reprise d'entreprises de multiplication par des groupes étrangers, disparition de la maîtrise du matériel végétal, perte du savoir-faire technique associé, perte de valeur ajoutée française, disparition des réseaux de logistique associés, ..., au profit des fournisseurs étrangers. L'ensemble de la filière risque d'être encore fragilisé par cette évolution si aucune action n'est mise en œuvre.

Les cultures de plantes médicinales, aromatiques et à parfum (PPAM) en France représentent quant à elles plus de 53 000 ha (soit un chiffre d'affaires supérieur à 120 millions d'euros pour un chiffre d'affaires de la filière après transformation de 4 milliards d'euros). Ces surfaces sont en nette progression depuis quelques années, du fait d'une demande de plus en plus forte qui accentue les besoins en jeunes plants. Une remise en question quant à la capacité de production en jeunes plants de qualité est en cours.

Le développement d'autres filières moins importantes mais en croissance, comme la production de petits fruits rouges et de houblon, se heurte également à un approvisionnement insuffisant en jeunes plants de qualité.

La prise en compte de la multiplication du matériel végétal à travers des démarches de filière apparaît, à un nombre de plus en plus important d'acteurs, comme une nécessité stratégique pour le maintien de la compétitivité de ces filières.

### ❖ **La multiplication végétative et le bouturage de tiges**

Pour Preece (2003), d'importants progrès ont été réalisés depuis un siècle dans la multiplication végétative des plantes notamment à travers l'étude des types de matériels biologiques utilisables, la désinfection des supports de culture, les méthodes pour réduire la transpiration des boutures, l'étude de la juvénilité du matériel végétal, l'utilisation d'hormones et la micropropagation.

Pour Hackett et Murray (1994), les succès rencontrés pour de nombreuses espèces en utilisant les auxines et différentes variables environnementales en conjonction avec une connaissance appropriée des stades optimum de développement des pieds mères ne doivent pas occulter qu'il existe encore de nombreuses espèces pour lesquelles le bouturage n'atteint pas un niveau de réussite suffisant pour être exploité commercialement. Pour les multiplicateurs, un taxon est qualifié de difficile à multiplier quand le taux de réussite du bouturage se situe entre 60 et 80 % et très difficile quand il est inférieur à 60 %.

Les itinéraires de bouturage utilisés par les pépiniéristes français se sont orientés principalement depuis plusieurs décennies vers des itinéraires de type 'Low Tech'. Ils sont réalisés avec du matériel ligneux ou semi-ligneux en plaques alvéolées remplies de substrat, en jours courts et le plus souvent sans chauffage. Le maintien de l'hygrométrie est opéré à l'étouffée, par les techniques de « mist ou par fog » avec un contrôle de l'humidité du substrat insuffisant. L'état physiologique des pieds mères est également peu contrôlé. Ce système de multiplication, du fait des facteurs limitants qu'il induit, ne permet pas d'exploiter pleinement les potentialités de croissance des végétaux. Il en résulte des durées d'enracinement longues, hétérogènes, avec des taux de réussite et une qualité des jeunes plants variable, en particulier pour les espèces dont l'enracinement est lent et difficile.

Malgré ces limites, ce système reste très développé car l'utilisation de boutures ligneuses en jours courts permet de ne pas avoir à optimiser finement la gestion de l'hygrométrie pour éviter leur déshydratation à la différence de la mise en œuvre de boutures herbacées ou semi-herbacées. Cependant, pour Peterson *et collaborateurs* (2018) et pour Sanchez (2019), les moyens utilisés pour maintenir le statut hydrique des boutures avant l'enracinement (confinement, mist, fog) créent des conditions asphyxiantes à la base des boutures et favorisent les maladies (*Botrytis*, *Pythium*). Ces risques sont accrus ainsi que l'utilisation d'intrants (eau, éléments fertilisants, plastiques, produits phytosanitaires) du fait de l'enracinement lent induit par le manque d'optimisation de la conduite. La durée de multiplication se situe ainsi entre 4 et 8 mois et peut être prolongée de plusieurs mois à 1 an lorsque les boutures enracinées sont rempotées en godets ou en pré-conteneurs avant le repotage final. En France, ce système n'a pas évolué depuis plusieurs décennies. La qualité des jeunes plants livrés aux pépiniéristes éleveurs est de ce fait variable d'une année à l'autre et sa mise en œuvre est donc peu efficace pour les taxons dont l'enracinement est lent et difficile. Cette absence d'évolution limite les possibilités d'adaptation de la filière pépinière française au besoin d'innovation végétale et est une des causes de la perte de compétitivité de la filière.

Pour Dorion (2013), les facteurs qui influencent la capacité d'enracinement des boutures sont complexes. Il s'agit de facteurs internes qui sont fixés (génétique, maturité, polarité) ou non (hormones, métabolites), liés à la plante mère, à la bouture et/ou de facteurs externes (environnement physique et chimique).

Haissig (1986) rappelle que les preuves d'un contrôle génétique de l'enracinement adventif existent : différences dans l'aptitude à l'enracinement adventif entre et à l'intérieur de genres (ex : *Populus*), mutation affectant cette capacité, différences entre familles dans la réponse à l'application d'auxines, capacité de régénération en microculture dépendant de gènes spécifiques.

En ce qui concerne les liens entre la juvénilité et l'aptitude au bouturage, Beaujard et Galopin (1999) et Galopin *et collaborateurs* (2010) ont montré l'intérêt de démarches de rejuvénalisation de pieds mères par des recépages successifs sur différentes espèces (*Forsythia*, *Hydrangea*, *Ostrya*) pour obtenir des taux élevés de boutures enracinées, homogènes et standardisées. Les travaux de Franclet (1977) sur la rejuvénalisation de différents conifères soulignent également l'importance de ce facteur sur l'aptitude à l'enracinement des boutures.

Certains facteurs endogènes comme la position des bourgeons sur la tige peuvent également entraîner un développement hétérogène (Le Bris *et collaborateurs*, 1998). L'utilisation d'une forte proportion de boutures de tronçons au détriment des boutures de têtes conduit ainsi à observer un enracinement hétérogène dans un lot de boutures.

L'utilisation des auxines a fait et fait encore l'objet de nombreuses études pour améliorer l'enracinement des boutures car cette hormone joue un rôle central dans la capacité des plantes à émettre des racines. Elle aurait cependant une action sur la rhizogenèse essentiellement durant la phase d'induction qui intervient généralement jusqu'à 96 heures après le prélèvement des boutures (da Costa *et collaborateurs*, 2013).

L'importance de l'oxygénation du milieu pour l'enracinement des boutures a également été démontrée. Ainsi, la formation de racines de boutures de *Poinsettia* et de *Rosa* est fortement influencée par l'aération et les propriétés physiques du substrat de multiplication (Gislerod, 1983; Gislerod *et collaborateurs*, 1997). En condition d'anoxie ou hypoxie, la formation des racines sur les boutures est fortement inhibée. Soffer & Burger (1988 a, b), dans un système de culture mixte hydro-aéroponique, ont également montré que l'oxygène dissout est essentiel à la formation de racines de boutures et à leur croissance. Une concentration en oxygène dissout passant de 8 mg /L à 0 mg /L diminue très fortement le pourcentage de boutures enracinées et le nombre de racines émises sur *Ficus benjamina* et *Chrysanthemum*.

Sharma *et collaborateurs* (2018) et Peterson *et collaborateurs* (2018) citent également les effets néfastes de températures trop basses et d'un manque d'optimisation de la nutrition minérale sur l'enracinement des boutures.

Les travaux de Gislerod (1983) confirment également le rôle très positif des températures élevées sur l'enracinement de boutures de *Poinsettia*.

Ces travaux laissent penser que les méthodes traditionnelles de bouturage utilisées par les multiplicateurs français pourraient être peu compatibles avec les exigences des espèces difficiles à bouturer.

Pour pallier à ces difficultés, Mary (2018, 2020) a montré sur plusieurs espèces d'arbustes (*Choisya*, *Mirtus*, *Euonymus*, *Viburnum tinus*) l'intérêt d'un itinéraire de multiplication optimisé rassemblant plusieurs composantes telles que le bouturage semi-herbacé, une multiplication en jours croissants ou longs, l'utilisation de boutures de têtes récoltées sur des pieds mères cultivés préparés et renouvelés fréquemment et le repiquage des boutures en mottes de culture industrielles pour améliorer l'aération du substrat. Un contrôle satisfaisant de l'hygrométrie et de l'humidité des mottes est également nécessaire. Cet itinéraire permet de raccourcir très fortement la durée de multiplication (1 à 2 mois contre 4 à 6 mois pour la méthode de référence avec un taux de réussite élevé pour les espèces citées). Toutefois, certaines espèces se prêtent mal au bouturage herbacé ou semi-herbacé dans ces conditions (*Photinia*, *Pittosporum*, *Rhamnus* par exemple). De plus, cet itinéraire reste soumis à une production de jeunes plants dans des modules en plastique non réutilisables.

Peterson *et collaborateurs* (2018), Sharma *et collaborateurs* (2018) et Sanchez (2019) proposent d'utiliser un autre système de multiplication, l'aéroponie qui permettrait de dépasser les limites du bouturage sur substrat avec contrôle de l'hygrométrie par fog ou mist, en particulier pour améliorer l'apport d'oxygène aux racines en formation.

### ❖ Principe de l'aéroponie et effet de différents facteurs de production sur la croissance

L'aéroponie est une technique de culture hors-sol sans utilisation de substrat. La plante est fixée sur un dispositif de maintien, ses racines se développent dans l'air et captent un brouillard nutritif (Gautreau et Machefer, 2010). L'aération des racines est optimale. Une solution nutritive est brumisée sur les racines, ce qui permet une alimentation non limitante. On estime qu'un système hydroponique ou aéroponique permet d'économiser environ 90 % de l'eau nécessaire à une culture en pleine terre (Proksch et Gundula, 2017).

En aéroponie, un certain nombre de facteurs influencent l'émergence des racines et leur vitesse de développement :

- Le contrôle de la température de la solution brumisée permet une meilleure ramification des racines et une meilleure assimilation des nutriments (Christie et Nichols, 2004 ; Molitor et Fischer, 1999 ; Jie, 2010).
- L'oxygène apparaît comme un facteur clé de l'enracinement (Naidoo, 2012 ; Soffer et Burger, 1988a et b).
- Pour Martin-Laurent *et collaborateurs* (1997), une humidité relative maintenue dans le compartiment racinaire à 80 à 85 % semble convenir.
- La taille des gouttes et la brumisation dans la chambre de culture par des buses haute pression produisant des gouttelettes faisant 300 à 500 µm est utilisée par Lee (1993).
- La concentration en sels minéraux de la solution brumisée semble jouer un rôle important.
- Pour Zieslin et Snir (1988), un pH trop élevé (pH 8) de la solution brumisée pénalise fortement la croissance du système racinaire du rosier.
- L'utilisation d'hormones de bouturage est également citée comme facteur influençant la vitesse d'enracinement en aéroponie (Sharma *et collaborateurs*, 2018 ; Mehandru *et collaborateurs*, 2014).

Les travaux les plus récents sur le bouturage des végétaux par aéroponie laissent penser que les avantages de l'aéroponie décrits pour la croissance de plantes déjà enracinées seraient comparables pour des boutures non enracinées.

Des travaux montrent également la possibilité de cultiver certaines PPAM en aéroponie comme le millepertuis (Giurgiu *et collaborateurs*, 2017), le thym (Al Karaki et Othman, 2009), la sauge officinale (Traykova *et collaborateurs*, 2018). Les résultats montrent une augmentation de la biomasse produite et une accélération du cycle de production.

### ❖ La multiplication par aéroponie (Sub-mist system)

La culture en aéroponie est connue comme technique de culture depuis de nombreuses années et fait l'objet d'une vaste littérature scientifique. L'enracinement en aéroponie des végétaux étudiés à partir de boutures non racinées est notamment cité pour des travaux sur chrysanthème, œillet et kalanchoe (Altman et Rothem, 1988), sur rosier (Zieslin et Snir, 1988) ; sur chrysanthème et *Pentas* (Son *et collaborateurs*, 1994) et sur *Begonia*

(Ottoson et Welander, 1996). Mais, les effets de la technique de culture sur l'enracinement des boutures n'ont pas été décrits car ces recherches avaient d'autres objectifs que la multiplication.

Plus récemment, l'utilisation de l'aéroponie comme méthode de multiplication a été proposée par plusieurs auteurs pour améliorer l'enracinement des boutures.

Mehandru *et collaborateurs* (2014) ont exploré la faisabilité de l'aéroponie pour le bouturage de 3 espèces endémiques indiennes, *Caralluna edulis*, *Leptadenia reticulata* et *Tylophora indica* par rapport au bouturage traditionnel en sol. Avec l'aéroponie, le taux de boutures enracinées n'est amélioré que de 17 % mais, le nombre moyen de racines par bouture et la longueur des racines le sont respectivement de 95 % et de 74 %.

Sur *Tamarix aphylla*, un arbre halophyte indien, Sharma *et collaborateurs* (2018) ont montré que le taux de boutures enracinées pouvait atteindre 79 % avec un bouturage de tige par aéroponie et un traitement hormonal adapté contre seulement 42 % pour la méthode d'enracinement traditionnelle en sol (avec auxine). Le nombre de racines et leur longueur sont très nettement améliorés avec le bouturage par aéroponie. 95 % des boutures enracinées survivent ensuite lors de transplantations en sol.

Peterson *et collaborateurs* (2018) ont utilisé cette méthode sur *Coleus* et ont obtenu 8 fois plus de matière sèche racinaire en 21 jours de multiplication qu'avec la méthode de multiplication de référence sur perlite avec brumisation des parties aériennes par mist. En aéroponie, sans brumisation des parties aériennes, la turgescence de toutes les boutures a été maintenue de façon comparable au témoin. La transplantation en substrat des boutures enracinées en aéroponie n'a pas posé de difficulté.

Martin-Laurent *et collaborateurs* (1997) ont montré que l'aéroponie a permis de produire des jeunes plants d'*Acacia mangium* à partir de boutures de tige deux fois plus rapidement qu'en hydroponie et quatre fois plus rapidement qu'en culture sur sable. Avec cette technique, en quatre mois, les plants mesurent 1 m de haut et le système racinaire est plus développé

Pour Peterson *et collaborateurs* (2018) et pour Sharma *et collaborateurs* (2018), le bouturage par aéroponie est donc en mesure de se substituer au bouturage sur substrat avec maintien de l'hygrométrie au niveau des parties aériennes par mist ou fog (Overhead Mist). Pour ces auteurs, grâce au bouturage par aéroponie, le maintien d'une forte hygrométrie au niveau des parties aériennes des boutures n'est plus nécessaire. Cet aspect serait toutefois à confirmer pour différentes conditions climatiques et différentes espèces. Sanchez (2019) et Sanchez *et collaborateurs* (2020) ont ainsi expérimenté cette technique de multiplication sur *Lantana* et sur *Syringa pubescens* en la comparant à la technique de multiplication de référence avec brumisation des parties aériennes et à une méthode mixte assurant à la fois une brumisation des parties racinaires et aériennes. Sur lilas, cette dernière technique a permis d'assurer un meilleur taux d'enracinement des boutures que les deux autres méthodes.

Par contre, il n'a été trouvé aucune référence sur la multiplication des PPAM par cette technique.

Dans un premier temps, le bouturage par aéroponie a également été testé à petite échelle de 2016 à 2018 pour la multiplication d'arbustes tels que lavandin, *Sorbaria* et *Hydrangea* par l'un des partenaires de ce projet, EST HORTICOLE. Ce test a donné des résultats très encourageants et un enracinement rapide des boutures a été obtenu avec un taux de réussite élevé pour les 3 espèces mais ces tests ont été réalisés à petites échelles. Il apparaissait dans ces tests que le maintien du statut hydrique des boutures en aéroponie en condition estivale et en région continentale peut être assuré en jouant sur la fréquence de brumisation au niveau du compartiment racinaire.

#### ❖ Le projet X-Aéropo – Des premiers résultats très intéressants

Suite à ces premières observations, un premier projet a été déposé pour étudier cette technique en horticulture ornementale. Ce projet fait l'objet d'un financement CASDAR France AgriMer pour la période 2020-2022. Ce projet visait à observer la faisabilité de la technique et à étudier les effets de facteurs endogènes et exogènes sur le comportement de boutures de quelques espèces modèles de façon à préciser les conditions du bouturage par aéroponie. La reprise des boutures enracinées lors de l'empotage a également été étudiée.

Les résultats des travaux menés en 2020 et 2021 sont très intéressants. Ainsi, nous confirmons qu'il est possible d'enraciner des boutures d'arbustes par la technique de l'aéroponie à différentes périodes de l'année et sous les climats de plusieurs régions françaises. L'enracinement des boutures est également très rapide pour certaines espèces. Sur *Euonymus japonicus* 'Emerald Gold', les premières racines sont visibles 3 à 5 jours après le

bouturage et des jeunes plants sont empotables en conteneurs 14 à 20 jours après le bouturage avec un taux de reprise excellent. 100 % des boutures se sont enracinées et ont repris après l'empotage.

Pour une autre espèce, connue pour avoir des boutures qui s'enracinent plus lentement et de façon plus aléatoire, comme le *Photinia*, il est nécessaire de résoudre la question de l'utilisation d'AIB pour permettre une rhizogénèse plus facile. Pour cela, une méthode de traitement auxinique adaptée au bouturage par aéroponie a été mise au point. L'enracinement obtenu pour cette espèce est alors très intéressant, avec l'apparition de nombreuses racines vigoureuses à la différence de l'enracinement sur substrat où les racines sont moins nombreuses et plus chétives. De ce fait, la plantule bénéficie de points d'absorption d'éléments minéraux plus nombreux. Ce facteur influence de façon positive la vigueur des jeunes plants lorsqu'ils sont repotés en conteneur. On observe alors une capacité de ramification des jeunes plants qui est fortement améliorée par rapport à des jeunes plants issus d'un bouturage sur substrat.

L'exemple du lavandin montre quant à lui, que les types de boutures (têtes, tronçons) et leur niveau de lignification peuvent jouer un rôle important sur la réussite du bouturage par aéroponie comme c'est le cas également pour le bouturage sur substrat.

En règle générale, le bouturage par aéroponie a été plus rapide et a permis d'obtenir un % de boutures enracinées plus élevé que le bouturage de référence sur substrat en mottes de culture sous fog et avec chauffage du sol pour *Euonymus* et *Lavandula* et *Photinia*.

Par ailleurs, on observe que la survie des boutures est très nettement améliorée avec l'aéroponie. Les risques sanitaires sont fortement diminués car l'environnement des parties aériennes des boutures est beaucoup plus sain puisque seules les parties racinaires sont brumisées.

### **III. Les enjeux auxquels répond le projet**

Ce projet vise à répondre aux enjeux suivants :

#### **❖ Une évolution inquiétante du secteur de la multiplication en France :**

Comme expliqué dans le chapitre précédent, l'évolution du secteur de la multiplication des plantes ornementales, PPAM, petits fruits est préoccupante pour de plus en plus d'acteurs de la filière. En 2021, suite à une relance de la demande de végétaux d'ornements, des tensions très fortes sont même apparues sur le marché des jeunes plants avec un risque de pénurie très prononcé (Fayolle et Maillard, 2021). Ce symptôme, s'il est conjoncturel, est tout de même la conséquence de tendances structurelles moins favorables.

Des enjeux essentiels pour le secteur seront d'améliorer sa compétitivité et l'autonomie en jeunes plants des filières concernées. Ce projet peut leur donner un outil supplémentaire pour atteindre ces enjeux.

Ainsi, le bouturage par aéroponie pourrait permettre :

- Pour les multiplicateurs : d'améliorer leurs process, en particulier pour les espèces dont l'enracinement est long et incertain, de façon à fournir à leurs clients une qualité de jeunes plants moins aléatoire et répondant aux exigences des filières.
- Pour les producteurs éleveurs ayant délégué leur multiplication à des fournisseurs étrangers, de réinvestir une partie de leur activité dans la multiplication avec des risques techniques maîtrisés de façon à accroître leur autonomie en jeunes plants.

#### **❖ Des techniques de multiplication qui restent très traditionnelles et limitent les possibilités d'évolution**

Les techniques de multiplication « low tech » utilisées par les multiplicateurs français se traduisent généralement par des durées d'enracinement longues, hétérogènes, avec des taux de réussite et une qualité des jeunes plants variable d'un lot à l'autre et d'une année à l'autre, en particulier pour les espèces dont l'enracinement est lent et difficile.

L'utilisation de ce type de jeunes plants nécessite de réaliser plusieurs tailles pour obtenir une ramification satisfaisante. Les jeunes plants doivent subir aussi des repotages successifs dans des contenants de tailles croissantes. Cet itinéraire technique augmente d'autant les coûts de multiplication.

Ce schéma, qui a peu évolué depuis de nombreuses années, bloque l'adaptation des itinéraires de production des végétaux d'ornement aux exigences commerciales, économiques, organisationnelles et environnementales

les plus récentes. Il impose notamment une très faible souplesse dans les calendriers de livraison de jeunes plants par les multiplicateurs aux pépiniéristes éleveurs. De plus, ces jeunes plants, avec leur module de culture et leur conditionnement, sont relativement pondéreux et ne bénéficient que d'une logistique très contrainte et coûteuse.

#### ❖ **Des enjeux environnementaux difficiles à relever avec les techniques actuelles**

Le bouturage de tige oblige à placer les boutures pendant la phase d'enracinement dans un environnement chargé d'hygrométrie pour éviter leur déshydratation. Ces conditions sont très favorables à l'apparition de maladies cryptogamiques qui peuvent entraîner des pertes non négligeables de matériel végétal, surtout si l'enracinement est lent. Aussi, pour limiter ces risques, l'utilisation de fongicides est nécessaire. Cette utilisation est quasiment constitutive de la technique de bouturage et est accentuée par la mise en œuvre qui en est faite par les multiplicateurs français.

Le bouturage par aéroponie permet de ne pas avoir à brumiser de l'eau sur les parties aériennes des boutures pendant la phase d'enracinement pour conserver leur turgescence (seulement dans le compartiment racinaire). Ce facteur limite radicalement les risques de maladies du feuillage et l'utilisation de produits phytosanitaires pendant cette phase.

De plus, la qualité de l'enracinement dans un lot de jeunes plants est souvent hétérogène, en particulier pour les espèces à enracinement lent. Cette hétérogénéité accentue les risques sanitaires lors des démarrages de cultures car les décisions d'irrigation sont compliquées à prendre et des asphyxies des jeunes plants les plus chétifs sont alors fréquentes. La qualité du jeune plant est un levier pour réduire l'utilisation des produits phytosanitaires dans les itinéraires de culture.

Les résultats du projet FAM X-Aéroponie montrent que la vigueur des jeunes plants obtenus par aéroponie et la qualité de leur enracinement permet une très bonne reprise des plantes après le repotage.

De plus, ce système de culture en circuit fermé avec recyclage de l'eau permet d'éviter les rejets vers le milieu naturel et de réduire l'utilisation d'intrants (eau et engrais). Il permet également de s'affranchir des modules de culture en plastique (plaques, godets) qui sont utilisés de façon généralisée lors de la multiplication par les méthodes traditionnelles. Or, ces modules après utilisation finissent généralement en déchets et les quantités utilisées annuellement par la filière sont très importantes. Or, il n'existe pas pour le moment de plaques de multiplication biodégradables.

Par ailleurs, du fait de la rapidité de l'enracinement qui est obtenue, la multiplication par aéroponie devrait permettre de raccourcir les itinéraires de cultures grâce à une meilleure exploitation des potentialités des végétaux. Or, les premiers essais de raccourcissement des itinéraires de culture en pépinière ornementale par la mise en œuvre d'une méthode de multiplication optimisée qui ont été réalisés montrent que les risques phytosanitaires s'en trouvent mécaniquement diminués. Ce facteur est en mesure de faciliter la baisse de l'utilisation des produits phytosanitaires.

#### ❖ **De fortes évolutions du contexte technico-économiques pour les filières**

Les coûts de production en pépinière ornementale sont fortement impactés par la longue durée des itinéraires de culture traditionnels (plusieurs années parfois) qui est liée en partie à la phase de multiplication et par le potentiel des jeunes plants. En effet, les conditions de bouturage sur substrat et le matériel végétal ne permettent pas un enracinement et une ramification rapides du jeune plant. Il est alors nécessaire d'allonger les itinéraires de culture et de multiplier certaines opérations techniques (repotages successifs dans des conteneurs de volume croissant, tailles, distançages ....). Or, la concurrence internationale du marché des végétaux exerce une forte pression sur la filière pépinière française qui ne bénéficie pas des mêmes avantages comparatifs que ses concurrents. Restaurer la compétitivité de la filière par la maîtrise des coûts de production est donc impératif. Optimiser les itinéraires techniques de la phase de multiplication et d'obtention de jeunes plants (point de départ de l'itinéraire de culture) est un levier essentiel pour relever le défi de la compétitivité internationale.

De plus, la multiplication par bouturage sur mottes de substrat reste aléatoire pour de nombreux taxons soumis à des difficultés d'enracinement ou à des enracinements lents, et cela aussi bien pour des espèces ornementales (*Camelia japonica*, *Rhododendron*, *Pieris*, *Daphnea*, *Rhamnus*, etc.) que pour des espèces destinées à un marché en plein développement comme la gamme des plantes à petits fruits (myrtille, bleuet, camérisse, etc.) ou les PPAM. Ici aussi, la capacité à produire en France en quantité et en qualité des jeunes plants est un enjeu socio-économique fort face à un marché en plein développement.

Ce projet participe également à répondre à plusieurs évolutions auxquelles est confrontée la filière pépinière française :

- Une forte demande d'innovations commerciales pour dynamiser les ventes et s'adapter aux demandes des consommateurs que ce soit par l'introduction de nouveaux genres ou de nouvelles variétés, de nouvelles présentations ou nouveaux calendriers de production de taxons déjà existants, de nouveaux marketings ou de nouveaux services.
- Une segmentation du marché des végétaux. On assiste à un développement très important de certains segments comme celui des plantes pour balcons et terrasses avec des plantes prêtes à poser alors que d'autres segments, comme les plantes de haies régressent. Rappelons que les plantes pour balcons et terrasses représentent dorénavant 50 à 60 % de végétaux vendus en France. Cette évolution concerne également certaines plantes « leader » du marché comme le rosier par exemple. En effet, traditionnellement, les rosiers sont greffés. Or, pour les plantes destinées au marché des balcons et terrasses, cette pratique très coûteuse n'est plus nécessaire. Cependant, de nombreuses variétés de rosiers de jardin de type hybride s'enracinent trop difficilement pour être commercialisées en pieds francs. L'utilisation d'une nouvelle méthode de multiplication est donc nécessaire.
- Un bouleversement des périodes de commercialisation : régression des ventes d'automne, explosion des ventes de printemps et depuis peu, accroissement des ventes d'été.

Ces évolutions ont des conséquences sur la production et bouleversent les itinéraires de culture car les produits végétaux recherchés sont différents de ceux des périodes antérieures. Elles se traduisent notamment par la nécessité d'offrir des végétaux d'aspects frais, possédant une très belle présentation (port compact avec une forte ramification, un bel aspect de feuilles et si possible selon l'espèce, vendus en fleurs) et une qualité constante durant toute la période de commercialisation.

Alors que traditionnellement les pépiniéristes mettaient en culture une production par an pour un produit donné, avec des itinéraires pouvant durer de une à plusieurs années et une qualité du produit évoluant au cours de la saison commerciale, il devient nécessaire d'envisager la mise en culture chaque année de plusieurs séries successives de façon à obtenir les produits frais et de qualité constante qui sont recherchés par la distribution spécialisée au moment où les consommateurs les demandent.

Par ailleurs, dans les schémas de production traditionnels, l'étape de planification des mises en culture est un exercice très délicat qui a souvent des conséquences négatives sur la compétitivité en raison de la difficulté d'anticiper précisément plusieurs années à l'avance les besoins du marché pour tel ou tel produit. Le développement d'innovation commerciale et l'adaptation de la gamme des végétaux produits seraient également facilités par la mise en œuvre d'itinéraires plus courts que ceux utilisés actuellement.

La lavande, largement cultivée par la filière PPAM, fait partie également des espèces dont la multiplication pose des difficultés. D'importantes pertes de jeunes plants sont observées chez les multiplicateurs et lors de l'implantation des cultures du fait de leur qualité et état sanitaire. L'entrée en production est également relativement tardive.

La filière houblon reste quant à elle confrontée à des méthodes de multiplication traditionnelles relativement longues à mettre en œuvre. Or, avec l'essor des microbrasseries, la filière nécessite un fort renouvellement variétal pour produire des bières originales. Une évolution des techniques de multiplication est recherchée pour accélérer les cycles de culture et diversifier la gamme.

Si la localisation de la production de jeunes plants sur le territoire est un enjeu économiquement important, en particulier pour des secteurs fortement importateurs, la multiplication est aussi le point de départ d'itinéraires de production et de filières complètes qui vont jusqu'aux consommateurs. De ce fait, c'est un levier essentiel pour améliorer la compétitivité et l'adaptation au marché de ces filières. Le bouturage par aéroponie est une voie à explorer dans ce contexte.

#### ❖ **Le bouturage par aéroponie, une opportunité pour dépasser les limites actuelles :**

Le projet FAM X-Aéropo débuté en 2020 a permis dès à présent de préciser un certain nombre d'avantages du bouturage par aéroponie :

- Maintien du potentiel de survie des boutures pendant une longue durée (jusqu'à plusieurs mois) tout en limitant très fortement le risque de maladies et de dépérissement des boutures car leurs parties aériennes ne sont pas maintenues en condition humide. De ce fait, l'utilisation de produits phytosanitaires par rapport à ce risque devient inutile.

- Possibilité de désaisonnaliser fortement la production de boutures voire de produire des boutures toute l'année (selon les taxons et les exigences par rapport au stade de lignification des boutures), de produire plusieurs séries de boutures par an pour répondre à la désaisonnalisation des périodes de commercialisation et à la nécessité de commercialiser sur de longues périodes des plantes de qualité identique.
- Accélération de la rhizogenèse. La base des boutures n'étant plus disposée dans du substrat souvent trop humide, le manque d'oxygène n'est plus un facteur limitant de la rhizogenèse.
- Economie d'énergie : avec ce procédé, en période où la température de l'abri peut être un facteur limitant de la rhizogenèse, il n'est nécessaire de chauffer que l'eau brumisée au niveau des racines. Le chauffage de l'abri à des températures élevées n'est plus nécessaire.
- Les volumes d'eau utilisés par le système sont réduits du fait de son recyclage et la diminution de la durée d'élevage des jeunes plants.
- Limitation de l'usage de plastique jetable et facilitation de la logistique des jeunes plants.

Le bouturage par aéroponie serait donc en mesure de limiter une grande partie des risques techniques associés à la multiplication. De ce fait, il pourrait faciliter une ré-appropriation de cette phase de la culture par une partie des producteurs qui l'avaient délaissée au profit de multiplicateurs et faciliter l'adaptation des multiplicateurs aux nouvelles exigences de la filière. Du fait des quantités de jeunes plants en jeux, les deux voies sont nécessaires.

**Toutefois, il n'existe pas pour le moment de dispositifs de bouturage par aéroponie permettant de produire de grandes quantités de jeunes plants à un coût acceptable pour intéresser la production.**

**Pour développer ce système de bouturage des végétaux par aéroponie, il est nécessaire :**

- De co-construire avec des multiplicateurs et des producteurs un dispositif pilote permettant d'industrialiser le procédé, de l'évaluer et de valider son fonctionnement.
- D'accélérer la diffusion de cette technique en la transférant chez plusieurs multiplicateurs et producteurs de façon à mieux la confronter aux exigences des professionnels.
- D'en réaliser l'analyse économique afin de préciser les coûts de sa mise en œuvre.
- De préciser, par une étude sociologique adaptée, l'acceptabilité de cette innovation par les multiplicateurs et les producteurs français.

**Cette démarche fait l'objet de ce projet.**

### **Références bibliographiques :**

- Al-Karaki G.N., Othman Y (2009). Soilless cultivation of some medicinal and aromatic herb plants under the conditions of Arabian Gulf region. Emir. J. Food Agric. 2009. 21 (2): 64-70 . <http://cfa.uaeu.ac.ae/ejfa.shtml>
- Altman A., Rothem T. (1988). A new fog aeroponics system for propagating and growing horticultural plants. Combined Proceedings – International Plant Propagators' Society, 38: 207-208.
- Beaujard F., Galopin G. (1999) : Nouvelles perspectives en multiplication végétative : formation et exploitation de micropieds-mères. PHM revue horticole, fév. 1999, N°400, pp 64-69.
- Christie C.B., Nichols M.A. (2004) Aeroponics-A production system and research tool. Acta Hort. 648, ISHS 6p.
- Da Costa C.T., De Almeida M. R., Ruedell C.M., Schwambach J., Maraschin F.S., Fett-Neto A.G., 2013. When stress and development go hand in hand : main hormonal controls of adventitious rooting in cuttings. Frontiers in Plant Science, Vol 4., art. 133, 13 pp.
- Davies Jr.F.T. , Davis T.D. , Kester D.E., 1994. Commercial Importance of Adventitious Rooting to Horticulture. In Biology of Adventitious Root Formation. Editors : T. D. Davis, B. E. Haissig. Springer, Boston, MA.
- Dorion N., 2013. Le bouturage ou comment naissent les racines adventives. Jardin de France, n°622. <https://www.jardinsdefrance.org/le-bouturage-ou-comment-naissent-les-racines-adventives>.
- Fayolle P., Maillard O., 2021. Jeunes plants -Face au risque de pénurie, anticipez vos commandes. Le Lien Horticole, n°1108, septembre 2021, pp :30-36.
- FNPHP. 2019-2020. Chiffres clés des entreprises de production de l'horticulture et de la pépinière.
- France AgriMer, 2017. Observatoire des données structurelles des entreprises de production de l'horticulture et de la pépinière ornementale par AND international.
- Francllet A., 1977. Manipulation des pieds-mères et amélioration de la qualité des boutures. AFOCEL, Etudes et recherches, n°8 – 12/77.
- Galopin G., Morel P., Gardet R., Patrier C. (2010) : Mass vegetative propagation of *Ostrya carpinifolia* by continual removal of axillary branches from juvenile donor plants. Propagation of Ornamental Plants, 10(2), pp 88-92.
- Gautreau, P. et Machefer, A. (2010). Techniques Horticoles, Tome 2. Hortivar Editions, 3ème édition.

- Gislerod H.R., Hans R. (1983). « Physical Conditions of Propagation Media and Their Influence on the Rooting of Cuttings ». *Plant and soil*, 75, 1-4.
- Gislerod H.R., Hans R., Baas R., Warmenhoven, M. et Berg, D. (1997). « EFFECT OF AERATION ON ROOTING AND GROWTH OF ROSES (REFEREED) ». *Acta Horticulturae*, no 450: 113-22. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1997.450.12>.
- Giurgiu et al. 2017. A study of the cultivation of medicinal plants in hydroponic and aeroponic technologies in a protected environment. *Acta Hort.* 1170, 671-678
- Hackett W. P., Murray J.R. (1994). Research on Adventitious Rooting: Where Do We Go from Here? . In *Biology of Adventitious Root Formation*. Editors : T. D. Davis, B. E. Haissig. Springer, Boston, MA 1994.
- Haissig B.E., 1986. Metabolic processes in adventitious rooting of cuttings. In : *New rootformation in plants and cuttings*. Ed. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht.
- Jie, H. (2010), Mineral nutrition of aeroponically grown subtropical and temperate crops in the tropics with manipulation of root-zone temperature at different growth irradiances, *Plant stress*, Global Science Books, 17p.
- Le Bris M., Champeroux A., Bearez P., Le Page-Degivry M.T. (1998). Basipetal gradient of axillary bud inhibition along a Rose (*Rosa hybrida* L.) stem : growth potential of primary buds and their two most basal secondary buds as affected by position and age. *Annals of Botany*, 81 : 301-309.
- Lee S.K. (1993). Aeroponic system as a tool to accelerate rooting of hardwood stem cuttings. *J. Sing. Nat. Acad. Sci. Singapore*. Numéro 20-21, pages 3-5.
- Martin-Laurent F., Lee S.K., Tham F.Y., He J., Diem H.G. et Durand P. (1997) A new approach to enhance growth and nodulation of *Acacia mangium* through aeroponic culture. *Biology and fertility of soils*. Volume 25, numéro 1, pages 7-12.
- Mary L., 2018. Pépinière - Multiplication des arbustes – Nouveau système pour raccourcir les cycles de culture. *Aujourd'hui & Demain*, novembre 2018, n°137, pp 19-25.
- Mary L., 2020. Arbustes, la multiplication en question. *Le Lien Horticole*, mai 2020, n°1095, pp24-25 (A paraître).
- Mary L., Brachet G., 2018. Tests de biostimulants en pépinière hors-sol. *Phytoma*, février 2018, n°711, pp 24-28.
- Molitor H.D., Fischer M. (1999). Effect of several parameters on the growth of chrysanthemum stock plantq in aeronics. *Proc. Int. Symp. Growing Media and Hydroponics. Acta Hort.* 481, ISHS, 179-186.
- Mehandru P., Shekhawat N.S., Manoj K. R., Vinod K. et Gehlot H.S. (2014). Evaluation of aeroponics for clonal propagation of *Caralluma edulis*, *Leptadenia reticulata* and *Tylophora indica* – three threatened medicinal Asclepiads. *Physiol Mol Biol Plants*, 20(3):365–373.
- Naidoo N. (2012) Genetic and environmental factors affecting rooting in *Eucalyptus Grandis* X *Eucalyptus Longistrata* hybrid cuttings. Doctoral dissertation.
- Ottoson B., Welander N.T. (1996). Transpiration rate in relation to root and leaf growth in cuttings of *Begonia x hiemalis* Fotsch. *Scientia Horticulturae* 68, 125-136.
- Peterson B.J., Sanchez O., Burnett S. E., J. Hayes D.J. (2018). Comparison of Four Systems for Propagation of *Coleus* by Stem Cuttings. *Hort Technology*, 28(2), 143-148.
- Preece J. E. (2003). A Century of Progress with Vegetative Plant Propagation ». *HortScience* 38, n° 5 (août 2003): 1015-25. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.38.5.1015>.
- Proksch, Gundula. (2017). *Creating Urban Agricultural Systems: An Integrated Approach to Design*. 10.4324/9781315796772.
- Sanchez O. (2019). *Submist as an Effective Method for the Rooting of Herbaceous and Woody Ornamental Plants by Stem Cuttings*. Electronic Theses and Dissertations. 2991. <https://digitalcommons.library.umaine.edu/etd/2991>.
- Sanchez O., Burnett S. E., Peterson B.J. (2020). Environment, Photosynthesis, and Adventitious Rooting of Manchurian Lilac Cuttings Propagated in Overhead Mist, Submist, and Combination Systems. *Hortscience*, 55(1): 78–82.
- Sharma, U., Kataria, V., Shekhawat, N. (2018), Aeroponics for adventitious rhizogenesis in evergreen haloxeric tree *Tamarix aphylla* (L.) Karst.: influence of exogenous auxins and cutting type, *Physiology and Molecular Biology of Plants*, volume 24, number 1, page 162-174.
- Soffer H. et Burger D.W. (1988 a) Studies on plant propagation using the aero-hydroponic method. *Symposium on High Technology in Protected Cultivation*. Numéro 230, pages 261-270.
- Soffer H. et Burger D.W. (1988 b). Effects of dissolved oxygen concentrations in aero-hydroponics on the formation an growth of adventitious roots. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 113(2) : 218-221.
- Son K.C., Byoun H.J., Chae S.C. (1994). Application of simple system for ultrasonic aeroponics on the rooting of Pentas and Chrysanthemum. *Journal of the Korean society for horticultural science* 35(4) 301-308.
- Traykova et al, 2018. Growth and Essential Oils of *Salvia officinalis* Plants Derived from Conventional or Aeroponic Produced Seedlings. *Agric. conspec. sci.* Vol. 84 (2019) No. 1 (77-81).
- Widehem C., Cheminat G., Doyen J., Plottu B. (2009). Végétaux de pépinière : du déficit du commerce extérieur français au défaut d'innovation. *PHM Revue Horticole*, PHM, revue horticole, 2009, pp.23-28. (hal-00730112).
- Zieslin N., Snir P. (1988). Responses of rose cultivar Sonia and the roostock *Rosa indica major* to changes in pH and aération of the root environment. *Acta Horticulturae* 226, 167-173.

## IV. Programme d'action

Les différentes actions du projet seront les suivantes :

### **Action 1 : Mise au point d'unités pilotes pour industrialiser le bouturage par aéroponie**

Les résultats du projet FAM X-Aéroponie 2020-2022 ont permis dès à présent d'élaborer un schéma de principe et un cahier des charges d'un dispositif d'aéroponie destiné à faire du bouturage de végétaux. Pour le moment, ce schéma de principe et ce cahier des charges prennent en compte différents facteurs de production (chauffage, oxygénation de la solution brumisée ..) mais n'intègrent pas les composantes organisationnelles et ergonomiques associées à une pratique du bouturage à grande échelle.

L'objectif de cette action sera de fabriquer et valider dans 3 stations expérimentales un prototype pré-industriel de bouturage par aéroponie qui soit adapté à une multiplication à forte densité et permettant de produire un nombre important de boutures tout en maîtrisant le temps de travail nécessaire à l'insertion et à la récupération des boutures dans le dispositif. La qualité des boutures enracinées obtenues en fin de processus doit également être mieux caractérisée de façon à bien répondre aux exigences des utilisateurs.

#### **Tâche 1.1. : Co-conception d'un dispositif pilote pour un transfert à l'échelle pré-industrielle.**

Dans un premier temps, avant la fabrication du dispositif d'aéroponie destiné à la multiplication par bouturage, un atelier de co-conception sera mis en œuvre pour mobiliser des producteurs (multiplicateur et éleveurs) des filières concernées, des équipementiers et les partenaires du projet afin de finaliser la conception du dispositif de façon à ce que le pilote construit réponde bien aux exigences et à la diversité des contraintes des utilisateurs.

Cette tâche sera mise en place dès le démarrage du projet, en 2022.

Pour cela, les partenaires du projet procéderont par des entretiens individuels avec des multiplicateurs et des producteurs des différentes filières concernées ayant une activité de multiplication et par des réunions favorisant les échanges et une réflexion collective. Ces réunions se tiendront au niveau régional avant qu'une mise en commun et une synthèse nationale soient réalisées.

Après un cadrage initial (présentation des objectifs, des échelles de travail, des acteurs), un diagnostic des systèmes de multiplication mis en place dans les exploitations sera entrepris. Ce diagnostic portera sur les aspects technique, économique, organisationnel et environnemental de la multiplication. Des indicateurs permettant de caractériser ces éléments seront décrits avec le groupe. Les enjeux opérationnels et les problématiques seront formulés et les attentes des producteurs identifiées en tenant compte des atouts, des opportunités, des contraintes et des menaces.

Cette démarche permettra d'enrichir le schéma de principe et de finaliser la conception du dispositif pilote de bouturage par aéroponie dans toutes ses composantes. Les aspects ergonomiques du prototype seront validés par un ergonome professionnel.

L'atelier de co-conception se réunira à nouveau au cours des différentes années du projet de façon à améliorer si besoin le prototype.

#### **Tâche 1.2. : Construction d'un dispositif pilote pour un transfert à l'échelle pré-industrielle.**

Ensuite, cette étape sera menée en collaboration avec des équipementiers pour développer un dispositif pilote de bouturage par aéroponie d'environ 15 à 20 m<sup>2</sup> permettant de produire plusieurs milliers de boutures en de nombreuses séries avec une conduite optimisée. Ce pilote permettra de valider la robustesse du procédé.

Différents aspects seront pris en compte lors de cette fabrication tels que la conception générale, le choix des matériaux, le système hydraulique et de brumisation, le chauffage, la fertilisation et l'oxygénation de l'eau brumisée au niveau du compartiment racinaire, la régulation de ces paramètres, la sécurité en cas de panne et le procédé d'insertion et de récolte des boutures sur leur support. Pour ce dernier point, un procédé innovant facilitant cette tâche est déjà envisagé.

3 dispositifs pilotes seront fabriqués pour être répartis entre 3 sites d'expérimentation (1 pilote /site). Ils seront placés dans des situations de production différentes (serre verre légèrement chauffée, peu chauffée et abri plastique hors gel). La viabilité du procédé en conditions pré-opérationnelles pourra ainsi être précisée.

Cette tâche sera mise en place en 2022 et au début de 2023.

Les plans et la descriptions précises des caractéristiques des pilotes installés feront partie des livrables du projet.

**Tâche 1.3. : Evaluation et validation technique du dispositif pilote et de l'itinéraire de bouturage en condition pré-opérationnelle.**

Au cours de cette tâche, réalisée en station sur 3 sites (départements 29, 45 et 88), on appliquera à une liste d'espèces à bouturer l'itinéraire de multiplication en aéroponie qui a été définie dans le cadre du projet X-AEROPO (projet France AgriMer 2020-2022) pour produire des quantités significatives de boutures. L'itinéraire intégrera ainsi les facteurs identifiés qui impactent la vitesse d'enracinement et le taux de réussite du bouturage (température, oxygénation, concentration en éléments minéraux, salinité et pH de la solution brumisée, stade de lignification, période de prélèvement des boutures et utilisation d'hormone de bouturage).

L'évaluation et la validation du dispositif pilote se feront à trois niveaux :

- D'une part, en ce qui concerne le fonctionnement des unités pilotes, de leur conception architecturale et de leurs différentes composantes techniques et matérielles (hydraulique, thermique, efficacité des régulations ...).
- D'autre part, en ce qui concerne la gestion de la main d'œuvre, l'ergonomie et les temps de travaux, en particulier pour les postes de travail qui concernent l'insertion des boutures dans le dispositif et leur récolte après enracinement.

Ces 2 niveaux permettront donc de collecter des données techniques et économiques sur le fonctionnement du procédé (consommation d'eau, d'électricité, d'énergie pour le chauffage, main d'œuvre, taux de réussite du bouturage, etc.) en condition pré-opérationnelle.

- Par ailleurs, au niveau des boutures enracinées produites, l'évaluation portera sur le taux de réussite du bouturage, la vitesse d'enracinement et qualité des boutures, la facilité de reprise après le repiquage ou la plantation, la qualité finale des végétaux. Le matériel végétal produit sera évalué en station dans un premier temps.

Cette tâche sera mise en place en 2023, en 2024 et au début de 2025.

Une liste d'espèces sera multipliée au cours de cette tâche. On observera le comportement d'espèces considérée comme étant à :

- enracinement facile, *Euonymus*, *Lavandula x angustifolia* (Lavandin), *Myrtus communis*, *Pelargonium*.
- enracinement moyen : *Humulus lupulus* (Houblon), *Poinsettia*,
- enracinement difficile : *Camelia japonica*, *Lonicera caerulea* (Camerisier), *Osmanthus x burkwoodii*, *Rhamnus alaternus*, *Vaccinum corymbosum*.

Cette liste sera précisée avec l'atelier de co-conception et le comité technique du projet et sera élargie si nécessaire en 2024 et 2025. Ces espèces seront réparties entre les sites à l'exception de quelques unes qui seront communes.

En ce qui concerne les effets de facteurs endogènes et du climat, la réalisation de cette tâche permettra d'identifier l'influence du stade de prélèvement des boutures sur l'enracinement et la réussite du bouturage pour les espèces sélectionnées et cela, pour différentes périodes de l'année. Des hormones d'enracinement seront utilisées pour les taxons le nécessitant. La méthode d'application des hormones utilisée sera celle qui a été validée dans le cadre du projet FAM X-AéroPO (en règle générale : trempage de la base des boutures pendant 4 heures dans une solution de 500 à 2000 mg /L d'AIB selon les taxons).

Ces essais de bouturage par aéroponie seront comparés à une méthode de multiplication de référence, sur substrat.

**Filière PPAM :** Le bouturage par aéroponie n'ayant pas été expérimenté jusqu'à présent par la filière PPAM, il serait prématuré de mettre en place un outil de taille pré-industrielle chez des multiplicateurs de cette filière. Par contre, la filière PPAM sera intégrée à la tâche 1.1 de façon à bénéficier des réflexions de l'atelier de co-conception.

L'évaluation du procédé, l'itinéraire de bouturage par aéroponie et l'itinéraire d'emportage-plantation des boutures enracinées produites feront parties des livrables du projet.

## **Action 2 : Transfert du procédé, des méthodes et du matériel végétal produit en conditions de production et élargissement à la filière PPAM**

Dès lors que les unités pilotes de bouturage par aéroponie auront été mises en place en station, que leur fonctionnement aura commencé à être évalué et qu'il aura été validé, il s'agira dans cette 2ème action :

- D'évaluer en production des quantités significatives de matériel végétal qui en sont issus en les diffusant auprès de producteurs.
- De transférer le procédé de bouturage chez plusieurs producteurs, multiplicateurs ou multiplicateurs-éleveurs pour assurer son évaluation en condition de production.

L'évaluation portera donc à la fois :

- Sur le matériel végétal produit et les itinéraires proposés et cela à plusieurs stades : comportement des boutures au cours du bouturage et de l'enracinement, qualité des boutures enracinées à la sortie du dispositif d'aéroponie, reprises lors de l'empotage ou de la plantation, qualité finale du végétal produit en cours de culture ou avant commercialisation.
- Sur le procédé de multiplication et ses équipements.

Ce déploiement permettra d'évaluer le procédé de bouturage par aéroponie en conditions opérationnelles, c'est à dire dans le système d'organisation socio-technique du producteur en cherchant à répondre à un besoin de production de boutures servant à démarrer des cultures de production.

Ce déploiement interviendra pour les filières ornement et PPAM.

### **Tâche 2.1 : transfert des boutures produites en condition de production**

Du matériel végétal produit au cours de l'action n° 1 sera évalué chez des producteurs qui vont le mettre en place dans leurs conditions de production afin qu'ils précisent les intérêts et les limites des boutures enracinées issues d'aéroponie. Ces producteurs adapteront leur itinéraire de culture *a minima* pour permettre une reprise correcte des jeunes plants. Ces derniers seront empotés en conteneurs ou plantés en pleine terre selon l'usage habituel de l'espèce. Ils seront distribués à 1 ou 2 producteurs différents /taxon /site pour des quantités allant de quelques centaines à quelques milliers de boutures /taxon.

Les cahiers des charges qualité des jeunes plants et des produits finis, les critères d'évaluation, les stades et les conditions d'empotage et de plantation seront co-construits avec les producteurs participants au projet en fonction de leurs exigences dans le cadre de l'ateliers de co-conception et du comité technique.

Les évaluations du matériel végétal seront réalisées à la fois par les expérimentateurs qui passeront dans les entreprises et les producteurs.

Cette tâche sera mise en place en 2023, 2024 et 2025.

### **Tâche 2.2 : Installation d'unités pilotes chez des multiplicateurs et des producteurs**

Les unités pilote transférées auront 2 dimensions. Ce seront :

- soit des unités pilotes de taille significative, conformes au dispositif évalué en station au cours de l'action n° 1, soit de 15 à 20 m<sup>2</sup> chacune pour produire quelques milliers de boutures à la fois. Ces unités pilotes sont destinées à des multiplicateurs ou des multiplicateurs-éleveurs de taille significative.

Ce déploiement se réalisera sur 3 sites en France dans le courant de l'année 2023. La production de boutures par aéroponie ne correspondra qu'à un besoin partiel de matériel végétal de l'exploitation de façon à ce que le pilote testé reste de dimension acceptable et d'un coût tolérable pour le projet. Les équipements et matériel servant à la fabrication du pilote seront financés par la station qui encadrera l'essai en entreprise. Ce financement se fera dans le cadre de ce projet et les équipements et matériel resteront la propriété de cette station. Le fonctionnement, et notamment la mise en œuvre du bouturage, la récolte des boutures, le suivi du processus seront assurés par l'entreprise. Une convention de prêt sera signée entre la station et l'entreprise. Le producteur pourra, selon sa spécialisation, utiliser en propre les boutures enracinées produites ou les distribuer à un autre producteur qui les empotera ou les plantera.

- soit des dispositifs d'aéroponie de petite taille, permettant de produire une centaine de boutures à la fois et qui seront d'un coût modeste. Ces dispositifs destinés à des entreprises de production voulant tester le

procédé de bouturage et qui sont partenaires du projet seront moins perfectionnés que les unités pilotes de grande taille et ne disposeront pas de toutes les régulations et automatismes de ces derniers. Mais, ils permettront d'obtenir des boutures enracinées issues d'aéroponie.

Au minimum, ce déploiement se réalisera sur 4 sites en France à partir de 2023..

Pour les différents essais réalisés en entreprises pour les 2 types d'unités pilotes, la mise en œuvre du bouturage et le suivi du dispositif d'aéroponie seront réalisés par l'entreprise et son personnel. Les chargés d'expérimentation des stations s'assureront de l'évaluation des dispositifs. Comme pour l'action° 1, l'évaluation des dispositifs pilotes se feront à trois niveaux :

- sur le fonctionnement des dispositifs pilotes, de leur conception architecturale et de leurs différentes composantes techniques et matérielles (hydraulique, thermique, efficacité des régulations..... ).
- Par rapport à la gestion de la main d'œuvre et les temps de travaux, en particulier pour les postes de travail qui concernent l'insertion des boutures dans le dispositif et leur récolte après enracinement.

Ces 2 niveaux permettront donc de collecter des données techniques et économiques sur le fonctionnement du procédé (consommation d'eau, d'électricité, d'énergie pour le chauffage, main d'œuvre, taux de réussite du bouturage, etc.) en condition opérationnelle.

- Par ailleurs, au niveau des boutures enracinées produites, l'évaluation portera sur le taux de réussite du bouturage, la vitesse d'enracinement et qualité des boutures, la facilité de reprise après le repiquage ou la plantation, la qualité finale des végétaux. Le matériel végétal produit sera évalué chez les producteurs qui vont le mettre en place dans leurs conditions de production. Les conditions environnementales de ces essais en production seront décrites parallèlement. Les facteurs permettant de s'assurer de la réussite du bouturage et de la reprise après le rempotage ou la plantation seront optimisés si nécessaire après analyse des situations et des résultats et discussions avec les utilisateurs de façon à assurer une utilisation optimale du matériel végétal produit.

### **Tâche 2.3 : Elargissement de la technique à la filière PPAM**

Cette tâche permettra de transférer la méthode de bouturage en aéroponie à la filière PPAM. Pour cela, le bouturage par aéroponie de la lavande 'Maillette' et les thymus chémotypés (*Thymus vulgaris*), connus pour être difficiles à multiplier, sera mis en oeuvre grâce à des modules d'aéroponie de taille expérimentale.

Ces modules seront installés sur le site de Chemillé de l'iteipmai, en bénéficiant de l'expertise du CATE de façon à observer la faisabilité de la technique pour ces 2 genres. Des facteurs endogènes aux boutures (types de boutures, stades de lignification), les effets du climat et de la période de bouturage ainsi que différents facteurs exogènes (chauffage, oxygénation, correction du pH de la solution brumisée) seront expérimentés.

Les jeunes plants produits seront ensuite évalués après plantation en pleine terre sur les deux stations expérimentales de l'iteipmai (dans la Drôme et dans le Maine-et-Loire). La période de la reprise après la plantation sera particulièrement observée.

Si les premiers résultats sont intéressants, le procédé sera transféré à des multiplicateurs de la filière en 2024 ou 2025 à l'aide de petits dispositifs d'aéroponie.

Les itinéraires de bouturage par aéroponie et d'empotage en conteneurs ou de plantation en pleine terre (selon les espèces) pour les différentes espèces étudiées seront alors enrichis de ces expériences.

Les livrables de l'action n° 1 seront enrichis des résultats et des expériences de l'action n° 2. De plus, des fiches techniques établies seront rédigées pour chaque site d'évaluation en présentant les perceptions du procédé étudié par le multiplicateur ou le producteur.

### **Action 3 : analyse économique et acceptabilité du procédé**

#### ***Tâche 3.1 : Etude de la viabilité économique et de la durabilité d'une production industrielle de jeunes plants par aéroponie.***

Cette tâche permettra de synthétiser les données techniques et économiques pour le fonctionnement du procédé (consommation d'eau, d'électricité, d'énergie pour le chauffage, main d'œuvre, taux de réussite du bouturage, taux de perte en culture, % de plantes commercialisées par catégorie de qualité, etc...) en conditions pré-opérationnelles et opérationnelles ainsi que les coûts d'investissement liés à la mise en œuvre du prototype. Grâce à ces données, il sera possible d'établir le coût de production du bouturage par aéroponie et de le comparer

au coût du jeune plant obtenu avec le système de multiplication traditionnel (les prix de vente des multiplicateurs serviront de référence).

L'acquisition de références sur le fonctionnement du bouturage par aéroponie dans des situations de production différentes (serre verre légèrement chauffée, peu chauffée et abri plastique hors gel lors de l'évaluation en station d'expérimentation et en production) permettra d'observer les répercussions de ces situations sur la performance de la technique et sur les coûts de production à travers la prise en compte des charges de structures liées à l'abri.

L'impact environnemental de la mise en œuvre du procédé sera également évalué et comparé au système de multiplication de référence. Différents indicateurs seront utilisés : consommation d'énergie, d'eau, d'engrais, IFT...(par bouture produite et par unité de surface et de temps).

### **Tâche 3.2 : Etude de l'acceptabilité de l'innovation et de ces retombées socio-économiques.**

Cette étude socio-économique aura pour objectif de répondre à un certain nombre de questions :

- Comment les multiplicateurs et producteurs perçoivent l'évolution de la filière jeunes plants en France et l'évolution du marché des jeunes plants ?
- Comment les producteurs se positionnent par rapport à un éventuel ré-investissement de leur entreprise dans une activité de multiplication ? Quels sont les freins au développement de la multiplication dans les entreprises d'élevage de végétaux ?
- Quelle est l'acceptabilité de l'innovation étudiée dans ce projet par les multiplicateurs et les producteurs (autres que les partenaires du projet) du fait des avantages et des contraintes qu'elle apporte.
- Quelles sont les fonctionnalités qui faciliteraient l'adoption de cette nouvelle technique par les multiplicateurs et les producteurs.
- Quelles sont les cibles les plus intéressées par cette technologie. En effet, pour le moment, on ne sait pas si les producteurs qui pourraient être les plus intéressés par le procédé sont par exemples des multiplicateurs spécialisés de taille significative ou au contraire des petits producteurs souhaitant retrouver une certaine autonomie en matière de jeunes plants alors qu'ils avaient abandonné cette activité. Or, les besoins de ces 2 types d'acteurs ne seront pas identiques.
- Quelles sont les retombées socio-économiques que l'adoption de cette technique pourrait induire dans les entreprises et au sein des filières concernées. Pour les filières, il s'agira ici d'une analyse prévisionnelle et non d'une étude *a posteriori*.

Pour cela, on réalisera :

- Une enquête quantitative auprès d'un échantillon large de producteurs ciblés parmi les adhérents d'ASTREDHOR (environ 1000 entreprises). Cette enquête sera réalisée par mail.
- Une enquête qualitative par entretien direct auprès de 30 entreprises françaises de production horticole ou de pépinière.

La méthodologie d'enquête utilisée (dont les questionnaires d'enquête) sera réalisée avec le soutien de Caroline Widehem, enseignante-chercheuse en économie à Agrocampus Ouest et de Sibylle Bui, enseignante-chercheuse en sociologie de l'innovation au Gredeg (Université côte d'Azur-Nice).

Cette action sera mise en œuvre en 2024 et 2025.

Les livrables seront notamment une fiche technico-économique synthétisant les données de coût de production de bouturage par aéroponie et une publication rapportant les résultats des enquêtes sociologiques.

## **Action 4 : Coordination du projet, diffusion et valorisation**

### **Tâche 4.1 : Coordination du projet.**

La coordination globale du projet sera réalisée par le chef de projet, Laurent MARY (CATE) avec des échanges entre partenaires pour obtenir une qualité optimale des résultats. Des comités de pilotage et comité technique annuels auront lieu sur les sites d'expérimentation.

### **Tâche 4.2 : Diffusion et valorisation des résultats aux professionnels.**

Les partenaires s'attacheront à diffuser largement les résultats de ce projet à travers la rédaction d'articles dans la presse agricole technique et scientifique, la participation à des conférences, au travers de journées techniques, de fiches techniques et de bulletins d'informations.

#### **Tâche 4.3 : *Transfert pédagogique.***

Débuter l'initiation d'étudiants aux nouvelles techniques de bouturage des végétaux encore peu diffusées jusqu'à présent apparaît comme une action essentielle pour modifier dans l'avenir les pratiques des entreprises. Le bouturage par aéroponie, du fait que les racines apparaissent rapidement et sont directement visibles, se prête bien à une activité pédagogique sur cette question.

Le transfert pédagogique se fera au travers de travaux pratiques sur le bouturage par aéroponie menés par l'école d'horticulture et de paysage de Roville-aux-Chênes (88) et par le Lycée agricole de l'Aulne à Châteaulin (29). Ce dernier réalisera un module de formation sur la multiplication des végétaux ornementaux. Les étudiants de ces lycées visiteront les stations d'expérimentation de proximité participant au projet. Les travaux seront également valorisés lors de la formation des étudiants ingénieurs en agronomie de l'Université de Lorraine (ENSAIA), en cycle de master et participeront à la multiplication d'une collection de variétés de houblon.

De plus, des stagiaires seront également accueillis dans les stations d'expérimentation pour travailler sur ce projet. Cette action sera mise en œuvre durant les années, 2023, 2024 et 2025.

## **V. RESULTATS ET DISCUSSION – TRAVAUX REALISES**

### **Action 1 : Mise au point d'unités pilotes pour réaliser le bouturage par aéroponie à grande échelle**

L'objectif de cette action est de fabriquer et valider en stations expérimentales un prototype pré-industriel de bouturage par aéroponie permettant de produire un nombre important de boutures tout en maîtrisant le temps de travail nécessaire à l'insertion et à la récupération des boutures dans le dispositif.

#### **Tâche 1.1. : Co-conception de dispositifs pilotes.**

La co-conception des dispositifs pilotes a été réalisée lors de plusieurs réunions en visioconférence avec des multiplicateurs et des pépiniéristes et par des discussions individuelles avec certains d'entre eux et des installateurs de matériels de serre.

Une analyse comparée des processus mis en œuvre pour produire des jeunes plants en condition professionnelle a été effectuée. Elle est présentée dans le tableau n°1. Elle répertorie notamment les différentes tâches et opérations à effectuer lors du bouturage et de l'élevage des jeunes plants au cours des deux process de production.

Si le matériel végétal utilisé au départ des 2 process est identique, on aboutit in fine à des jeunes plants différents. Avec le bouturage par aéroponie, le jeune plant produit se présente racine nue et il est nécessaire de l'acclimater en fin de processus dans un support solide pour l'utiliser dans un itinéraire de culture. Au niveau des opérations intermédiaires, le bouturage par aéroponie ne réclame pas d'opérations de nature fondamentalement différentes du bouturage sur substrat même si elles se font dans un contexte différents (repiquage, récolte, suivi, entretien...) et selon une organisation différentes. On peut donc estimer que les compétences nécessaires sont de même nature.

Ce travail a permis de :

- Préciser le questionnement technique et économique des professionnels par rapport à cette nouvelle technique de bouturage.
- Etablir un cahier des charges pour la conception d'un module d'aéroponie utilisable pour le bouturage des végétaux dans le cadre de ce projet et par des professionnels pour une utilisation à plus grande échelle.

**Le questionnement et les remarques des professionnels** recensé lors des différentes rencontres peut être classé selon les thématiques suivantes :

- La conception technique du dispositif d'aéroponie :
  - La partie du dispositif destinée à supporter les boutures est une question centrale des personnes interrogées. Elle doit permettre de mettre en place les boutures à enraciner et de récolter les boutures enracinées de façon relativement rapide, sans entraîner de surcoût de main d'œuvre rédhibitoire par rapport à la technique de référence. La pénibilité et les exigences de minutie du travail de production ne doivent pas non plus être accentuées.
  - La densité de bouture /m<sup>2</sup> de support doit être étudiée. C'est un critère important mais pas essentiel pour le bouturage sur substrat. Pour des raisons techniques, on peut abaisser la densité sans trop de difficulté dans des abris amortis car la surface n'est alors plus un facteur de coût important. Cependant, en aéroponie, la surface du dispositif sera un facteur de coût non négligeable. Aussi, la densité de boutures /m<sup>2</sup> doit être élevée tout en restant ci-possible modulable pour s'adapter à la taille des feuilles des taxons multipliés.
  - Ce dispositif doit pouvoir également s'adapter à des diamètres et des tailles de boutures différents.
  - La hauteur et l'ergonomie de la structure qui porte les supports de boutures et intègre la brumisation doivent être adaptées à la manipulation de ces supports, à la gestion, aux contrôles à effectuer lors du processus de production et à l'entretien du dispositif (notamment nettoyage, désinfection entre des séries...).
  - La conception du dispositif d'aéroponie doit également répondre aux exigences qui ont été précisées lors du projet X-Aéropo pour les caractéristiques de l'eau brumisée au niveau des parties racinaires : température, oxygénation, pH, Ec de l'eau.
  - Dans le bouturage sur substrat, l'unité de gestion n'est pas la bouture mais la plaque de boutures (plaques alvéolées dont il existe différents formats et tailles d'alvéoles). Cette unité de gestion est adaptée à la dimension industrielle de la production de jeunes plants. Est-il possible de travailler en aéroponie avec le même principe ? Pour cela, une forte homogénéité du comportement des boutures sur les plaques est recherchée.
  
- Les questions économiques :
  - La maîtrise du coût de production apparaît comme une exigence forte. Le coût de production /bouture enracinée et/ou jeune plant produit doit rester raisonnable, du même ordre de grandeur que celui des jeunes plants produits par la méthode de référence.
  - Pour certaines espèces difficiles à enraciner par les méthodes classiques, l'amélioration du taux de réussite du bouturage par l'aéroponie pourrait être un moyen de maîtriser ces coûts de production. La mesure de la performance du bouturage est un impératif.
  - Le temps de retour sur l'investissement de l'équipement doit rester raisonnable. Une durée de l'ordre de 5 à 6 ans serait souhaitable.
  - Si un enracinement plus fort des boutures est obtenu et qu'il permet de procurer un potentiel de vigueur supérieur au végétal, comment le valoriser ? Peut-on envisager de le valoriser par la production d'un jeune plant plus fort ? et à quel coût ? Pour cela, est-ce qu'il sera nécessaire d'exprimer ce potentiel par une conduite adaptée du jeune plant ?
  - Une analyse des coûts relativement complète de l'ensemble du processus de production doit être menée car il pourrait y avoir des compensations fortes entre différentes composantes du coût. Par exemple, un coût de manipulation des boutures plus élevé avec le bouturage par aéroponie pourrait être compensé par des coûts de traitements phytosanitaires plus faibles.
  - Combien de séries de boutures sera-t-il possible de réaliser dans l'année ? quelle influence cela aura-t-il sur les coûts de production ?
  - Les coûts de fonctionnement en énergie, électricité, eau et intrants divers sont à établir.
  
- La conduite du bouturage
  - Par rapport à l'application d'hormones d'enracinement, l'aéroponie modifie t-elle le besoin d'en utiliser et de quelle manière les appliquer ?
  - Le traitement de l'eau brumisé au niveau racinaire est à préciser. Est-ce qu'il y a d'autres facteurs à prendre en compte que la température, l'oxygénation, le pH et la salinité de l'eau ?
  - Est-ce que les avantages observés à petite échelle pour les aspects sanitaires avec le procédé d'aéroponie seront conservés à grande échelle ?
  - La gestion de l'hygrométrie au niveau des parties aériennes des boutures est-elle nécessaire ? Est-ce que le confinement des parties aériennes par un dispositif d'étouffé sera suffisant ? un procédé de brumisation dans la serre sera-t-il nécessaire ?
  - Si l'eau brumisée est chauffée, la température au niveau du compartiment racinaire est-elle suffisante ? Un chauffage complémentaire de l'abri en hiver est-il utile ?

**Tableau n°1 - Analyse des processus - Multiplication des arbustes par bouturage de tiges**

Tâches	Description de la tâche. Remarques	Bouturage de référence - Production de jeunes plants en alvéoles, sur substrat	Bouturage par aéroponie
Entretien et préparation des pieds mères	Différents modèles possibles. Plantes élevées en pleine terre, en conteneur ou prélèvement de boutures sur des cultures en cours, destinées à la vente et d'âges variables (bouturage en cascade).	Pas de différenciation selon le mode de bouturage	
Récolte des boutures		Pas de différenciation selon le mode de bouturage. Le même type de bouture est utilisé dans les 2 systèmes.	
Préparation des boutures	Recoupe à la bonne longueur et en fonction du nombre de feuilles voulues. Calibrage et tri en fonction de la qualité (diamètre de tige, état sanitaire...). Réduction des feuilles et wounding si nécessaire.	Pas de différenciation selon le mode de bouturage. Le même type de bouture est utilisé dans les 2 systèmes.	
Application d'hormone d'enracinement	Utilisé selon les espèces en fonction de leur capacité d'enracinement et selon le degré de lignification des boutures. Choix du type d'hormone, de la concentration et du mode d'application.	Application par poudrage à la base des boutures ou par trempage de la base des boutures dans une solution d'hormone de bouturage soluble. Si poudrage : temps d'application faible.	Application uniquement par trempage de la base des boutures dans une solution d'hormone de bouturage soluble. Durée de trempage : 4 heures en moyenne. Plus compliqué que le poudrage surtout si grande quantité de boutures.
Insertion des boutures dans le support de bouturage	Correspond à la phase de repiquage des boutures.	Le support de bouturage est constitué de plaques alvéolées à remplir de substrat (opération mécanisée ou non) ou près à repiquer dans le cas d'achat de mottes de culture industrielles (Fertiss, Jiffy...). Le repiquage est réalisé en atelier ou en serre si celle-ci est équipée de tablette de culture. Nécessite une ergonomie adaptée du lieu de travail. La gestion des stocks et des flux est nécessaire. Cas particuliers : achat de cuttings non racinés pour lequel les étapes antérieures sont externalisées.	Réalisable en atelier à condition que le support d'insertion des boutures soit adapté. nécessite une ergonomie adaptée du lieu de travail et du module d'aéroponie. Une gestion des stocks et des flux est nécessaire. Doit être fait à proximité du dispositif d'aéroponie pour ne pas que les boutures souffrent de dessiccation lors d'une logistique trop longue. Si achat de cuttings non hormonaux, l'hormonage par trempage est à faire si l'espèce le nécessite.
Mise en place des boutures dans l'abri ou la structure d'enracinement	Début par une phase de logistique interne.	Plus de souplesse puisque les boutures peuvent bénéficier de la réserve d'eau du substrat. Mais une certaine proximité entre l'atelier de bouturage et l'abri confiné pour l'enracinement est préférable.	Les boutures préparées doivent être mises en place rapidement sur le dispositif d'aéroponie pour être brumisée et éviter leur dessiccation.
Entretien et gestion de la structure d'enracinement		Structure de type abri plastique ou serre verre. Les plaques alvéolées sont posées au sol ou sur des tablettes. la structure est chauffée ou non selon les cas, ombrée ou non selon la période. Gestion de l'hygrométrie à l'étouffé ou par mist ou fog. La période et la durée d'enracinement sont des données importantes du fonctionnement et du coût du système. cette structure doit être entretenue, nettoyée et désinfectée.	Le dispositif d'aéroponie est placé sous un abri plastique ou une serre verre. Cet abri peut ne pas être chauffé (mais le dispositif d'aéroponie peut l'être) toutefois il doit être aérable pour éviter les surchauffes estivales. Pendant l'enracinement, les boutures sont alimentées en eau par une brumisation dans le compartiment racinaire. La gestion de l'hygrométrie dans l'ambiance de l'abri, au niveau des parties aériennes des boutures fait encore question. Est-il nécessaire de la gérer ? dans quelles conditions ? Est ce qu'un procédé de maintien à l'étouffé au niveau du dispositif d'aéroponie est suffisant ou doit-on installer un procédé de brumisation dans l'ensemble de l'abri ?
Suivi de l'enracinement - Irrigation, contrôle climat, contrôle de l'enracinement		Un suivi du climat de l'abri (températures d'ambiance, température du substrat, hygrométrie, déficit d'hygrométrie) en fonction de la météorologie (rayonnement solaire, température extérieure, hygrométrie, vent) et des possibilités d'intervention est nécessaire. Le suivi de l'humidité du substrat pour irriguer si nécessaire est très importants. le suivi de l'enracinement des boutures se fait plaque entière ou par échantillonnage dans les plaques. L'unité de gestion est la plaque d'alvéoles.	Un dispositif d'aéroponie est unité fonctionnelle à l'intérieur d'un abri. Un suivi du climat de l'abri (températures d'ambiance, température du substrat, hygrométrie, déficit d'hygrométrie) en fonction de la météorologie (rayonnement solaire, température extérieure, hygrométrie, vent) et des possibilités d'intervention reste nécessaire. La durée et la fréquence des brumisation dans le compartiment racinaire est à optimiser en fonction du climat et de la demande climatique en eau mais est simplifiée par rapport à la gestion des irrigations lors du bouturage en substrat. Le suivi de l'enracinement des boutures est en théorie facilité par le fait que les racines sont facilement visibles en soulevant les supports de boutures mais cette possibilité dépend fortement du type de support de culture qui sera conçu. Elle sera facilité dans les faits si l'unité de gestion est similaire à une plaque de boutures.
Suivi de l'enracinement - Contrôle sanitaire et intervention		La protection sanitaire est une dimension importante de la production de jeunes plants car le système de culture, en particulier au moment de l'enracinement, du fait du maintien d'hygrométries très élevées, favorise l'apparition des maladies fongiques. le suivi sanitaire est essentiel et les interventions pour appliquer des fongicides nécessitent du temps. En ce qui concerne la gestion des ravageurs, le risque reste très lié à l'état sanitaire des pieds mères.	les premières observations réalisées en l'absence de brumisation au niveau des parties aériennes laissent penser que le risque sanitaire fongique est largement minoré dans ce contexte. En ce qui concerne la gestion des ravageurs, le risque reste très lié à l'état sanitaire des pieds mères.
Récolte des boutures enracinées	Fin du processus d'enracinement en atmosphère confiné.	L'unité de gestion étant la plaque alvéolée, celle-ci est, selon les exploitations, soit retirée de l'abri confiné pour être placée dans un autre abri géré de façon plus classique, soit la gestion climatique de l'abri est modifiée (film de confinement retiré, mist ou fog arrêté). La règle de décision peut être la présence de suffisamment de racines apparaissant en dessous des plaques, le % de boutures enracinées estimé par un échantillonnage avec un seuil fonction des espèces : 80% de boutures enracinées pour les espèces s'enracinant facilement, 60% pour les espèces récalcitrantes à l'enracinement.	L'unité de gestion est encore à préciser. Elle sera fonction du type de dispositif d'insertion des boutures qui sera choisi. L'enracinement d'un lot de bouture devra être homogène afin de faciliter le travail de récolte des boutures en évitant un tri des boutures enracinées ou non enracinées. La récolte des boutures enracinées sera facilitée dans les faits si l'unité de gestion est similaire à une plaque de boutures. Si un tri des boutures en fonction de la qualité de l'enracinement est possible, cela permettra de valoriser les effets du process sur la qualité de l'enracinement.
Elevage des boutures enracinées pour produire des jeunes plants	Les boutures s'étant enracinées, il n'est plus nécessaire de les cultiver dans un itinéraire chargé d'hygrométrie pour éviter leur flétrissement.	Les boutures enracinées en alvéoles sont cultivées en attendant leur repotage dans un conteneur de taille supérieure. Cela permet d'assurer une certaine croissance des parties aériennes et racinaires. Selon les itinéraires de cultures qui sont très variés, le repotage des boutures enracinées en alvéoles se fait en godet ou en pré-conteneur. L'avantage du système est qu'il peut avoir un temps de latence plus ou moins long avant le repotage qui procure une certaine souplesse organisationnelle (même si agronomiquement, il est préférable de repoter les jeunes plants sans les laisser vieillir en plaque).	Les boutures enracinées qui sont récoltées présentent des racines nues et sont destinées à être empotées dans un contenant rempli de substrat sans interval de latence de façon à ce que les boutures ne se déshydratent pas. Le volume de ce contenant et les caractéristiques du substrat sont à préciser. Les possibilités d'un stockage temporaire en frigo de boutures enracinées retirées du dispositif d'aéroponie sont à étudier. Cette technique permettrait d'accroître la souplesse organisationnelle du système. En dehors des repotages d'hiver avec des jeunes plants relativement âgés et en arrêt de végétation, le repotage de jeunes plants en racines nues est peu connu et peu maîtrisé. Le savoir faire de cette technique est donc à acquérir.
Suite de la culture		Pas de différence significative entre les 2 origines de jeunes plants en général. Pour certains taxons, le bouturage par aéroponie permet de générer dans un certain nombre de cas, des enracinements très forts sur les boutures avec des répercussions favorables sur la qualité finale du produits.	

- De même, un ombrage au-dessus du dispositif est-il nécessaire dans la mesure où l'alimentation hydrique des boutures pourrait être améliorée par rapport au bouturage sur substrat grâce à la brumisation au niveau racinaire ?
- Il doit exister des possibilités de contrôler le niveau d'enracinement des boutures en cours de processus.
- Sera-t-il possible de conserver les avantages environnementaux identifiés (économie d'eau, d'énergie, d'intrants) avec le procédé expérimental à taille réduite lors du changement d'échelle ?
- La gamme végétale concernée par cette technique :
  - La gamme des taxons pour lesquels appliquer cette technique serait à privilégier est questionnée. Il apparaît important de travailler avec cette technique sur des taxons difficiles à enracer par les méthodes traditionnelles de bouturage car c'est probablement pour ces derniers que le développement de cette technique débutera. Certains taxons difficiles à bouturer par les méthodes traditionnelles sont abandonnés car trop coûteux à produire alors qu'il pourrait exister des débouchés commerciaux à des prix raisonnables. De même, il existe aussi des taxons multipliés par greffage car trop difficiles à bouturer en substrat mais qui sont abandonnés car le greffage coûte trop cher. Si le bouturage par aéroponie permet à la fois de diminuer le temps d'enracinement et d'améliorer le taux de réussite de la multiplication, la méthode sera d'autant plus intéressante. Ces 2 dimensions sont considérées comme importantes.
  - Il est également souligné que les multiplicateurs bouturent des lots de taille très différentes. Cette nouvelle méthode de multiplication pourrait aussi trouver sa place pour la multiplication accélérée de nombreux petits lots de boutures ou pour le développement de nouvelles variétés à condition d'apporter une certaine sécurité dans la phase de multiplication. Il sera difficile de concurrencer le bouturage en motte d'espèces se bouturant facilement à grande échelle. Mais, la diversification des taxons est une spécificité des multiplicateurs et des pépiniéristes français qui constitue un atout face à certains concurrents étrangers beaucoup plus spécialisés. Or, cette diversité coûte cher à mettre en œuvre, en particulier, au niveau de la multiplication. Cette nouvelle technique pourrait apporter une aide significative dans le contexte de la diversification.
  - La question est également posée de savoir comment prendre en compte les exigences différentes des végétaux avec cette nouvelle technique de bouturage ou y a-t-il plus de souplesse qu'avec la méthode traditionnelle ?
- Le type de jeune plant obtenu, c'est à dire des boutures enracinées en racine nue et en cours de végétation :
  - A l'issue de l'enracinement, les boutures enracinées sont en racine nue et doivent être empotées dans du substrat. Cette phase est perçue comme une phase critique. En effet, si le repotage d'hiver avec des jeunes plants relativement âgés et en arrêt de végétation est fréquemment pratiqué, le repotage de jeunes plants en racines nues, avec des racines peu développées et relativement fragiles en période de végétation est peu connu et peu maîtrisé. De nombreuses questions sont posées sur cette phase. Le savoir-faire de cette technique est donc à acquérir.
  - A quel stade d'enracinement, les boutures doivent-elles être empotées dans du substrat ? Et dans quel volume de contenant cela doit-il être fait ? De quelle souplesse organisationnelle dispose-t-on pour le faire ? Les racines sont-elles fragiles ? Les boutures enracinées peuvent-elles être stockées au frigo quelques jours avant l'empotage pour faciliter l'organisation du travail ? comment ces boutures enracinées peuvent-elles être transportées et sur quelle durée ?
  - Le bouturage et les jeunes plants ne doivent pas être considérés seulement par rapport à la qualité propre du jeune plant produit lors de la phase de multiplication mais aussi par rapport aux potentialités qu'offrent le jeune plant d'améliorer l'ensemble du cycle de culture jusqu'à la commercialisation des végétaux, de diminuer la durée des cultures, de maîtriser la qualité finale et les coûts de production.

**Le cahier des charges** destiné à encadrer la conception et la construction d'un dispositif de bouturage par aéroponie dans le cadre expérimental de ce projet mais également, en vue de développer le procédé en production, retient donc les points suivants :

Le procédé se décomposera en 3 parties distinctes :

- Une structure porteuse possédant un compartiment dans lequel la base des boutures devra produire des racines. Ce compartiment disposera d'un système de brumisation destiné à alimenter les boutures en eau. Il accueillera les dispositifs de maintien des boutures.
  - Ce dispositif de maintien des boutures séparera le compartiment racinaire du compartiment des parties aériennes des boutures.
  - Une unité de stockage et de traitement de l'eau destinée à être brumisée dans le compartiment racinaire.
- La structure porteuse devra présenter les caractéristiques suivantes :
- Posséder un compartiment dans lequel la base des boutures pourra être brumisée.
  - Supporter les dispositifs de maintien des boutures jusqu'à leur enracinement.
  - Les parties aériennes des boutures pourront être selon les cas de figure à l'air libre ou confinée à l'étouffé pour éviter leur déshydratation.
  - Proposer une ergonomie adaptée permettant une gestion et un entretien aisée du dispositif. La pose des supports de boutures devra être aisée et rapide.
  - Le système de brumisation pour produire du brouillard dans le compartiment racinaire devra permettre d'obtenir une bonne répartition de ce brouillard dans ce compartiment. Il ne doit pas exister d'effet de bordure.
  - Cette structure devra permettre la récupération de l'eau pour un fonctionnement en circuit fermé.
  - Un système de capot transparent doit pouvoir être positionner sur la structure pour exercer un confinement et conserver l'hygrométrie au niveau des parties aériennes des boutures.
  - Cette structure devra pouvoir être isolé de façon à limiter les déperditions thermiques. L'apport de chaleur au compartiment racinaire se fera par l'eau brumisée qui sera chauffée ou non selon la saison.
  - Le matériau de construction de cette structure ne doit pas être fragile, doit supporter le poids des dispositifs d'insertion des boutures sans ployer, doit empêcher les fuites d'eau, permettre un nettoyage et une désinfection facile. C'est un critère de choix très important pouvant affecter la durée de vie du dispositif, sa facilité d'utilisation, les possibilités de nettoyage et de désinfection ainsi que son coût.
  - Pour le dispositif qui sera mis en place au CATE et qui sera de dimension moyenne, une structure en inox est retenue. En dehors de son coût soit élevé, ce matériau répond aux autres critères. Pour une surface plus importante, le coût de l'inox nécessiterait de réfléchir à un autre matériau.
- L'ergonomie du dispositif de mise en place des boutures à enraciner et de récolte des boutures enracinées apparait comme un facteur essentiel à prendre en compte. Cet aspect est au cœur de la problématique de l'industrialisation du procédé. Plusieurs aspects ont été définis :
- Le temps passé à insérer les boutures à enraciner dans le dispositif d'aéroponie doit être du même ordre de grandeur que celui mis à insérer les boutures dans des alvéoles ou des mottes de culture lors du bouturage sur substrat.
  - La pénibilité et la minutie du travail ne doivent pas être accentuée par rapport à du bouturage en plaque alvéolée.
  - Le temps passé à récolter les boutures enracinées doit être raisonnable. Dans la mesure où il s'agit de boutures enracinées en racine nue, le temps d'emportage de ces boutures en fin de processus d'enracinement doit être pris en compte.
  - Le dispositif doit être adapté à des densité de boutures allant de 250 à 900 boutures /m<sup>2</sup>. La densité doit être modulable pour s'adapter à la taille des feuilles des taxons.
  - Le dispositif doit pouvoir s'adapter à différents diamètres de tige des boutures.
  - Le dispositif doit permettre de gérer des unités fonctionnelles de type plaque rassemblant un nombre conséquent de boutures (de l'ordre d'une ou quelques centaines de boutures) comme c'est le cas pour les plaques alvéolées utilisées lors du bouturage sur substrat.
  - La surveillance de l'état d'enracinement des boutures lors du processus d'enracinement doit être aisément possible.
  - Lorsqu'une zone du dispositif n'est pas occupée par des boutures à enraciner, il doit être possible de l'occulter de façon à éviter que le brouillard du compartiment racinaire ne remonte vers les parties aériennes.
  - Le dispositif d'insertion des boutures doit être construit avec un matériau ne se dégradant pas à l'humidité, réutilisable et facilement nettoyable.
  - Pour le moment, il n'existe aucun dispositif d'insertion des boutures répondant à ces critères. Un dispositif reste à imaginer. Le point de départ qui servira à comparer les performances du ou des dispositifs à définir pour le dispositif qui sera mis en place au CATE sera l'utilisation de plaque trouée en PVC expansé (Comacel) de 50 x 53 cm et d'une épaisseur d'un cm dans

laquelle pourront être insérées soit 448 boutures /m<sup>2</sup> (trous de Ø3 cm) soit 888 boutures /m<sup>2</sup> (trous de Ø2 cm) selon les dimensions des boutures et du feuillage. Les boutures sont insérées dans les trous et bloqué à l'aide d'un morceau de mousse de 2 cm d'épaisseur et de diamètre adapté.

- L'unité de stockage et de traitement de l'eau brumisée devra présenter les caractéristiques suivantes :
  - Une réserve d'eau suffisante permettant d'avoir une autonomie de plusieurs jours sans faire appel à un apport d'eau externe. Cette autonomie est fixée à 40 L d'eau minimum /m<sup>2</sup> de bouture. Elle devra pouvoir être vidangée.
  - Un système de pompage pour la brumisation dans le compartiment racinaire avec une filtration adaptée pour éviter les bouchages des buses de brumisation.
  - Les buses de brumisation seront du type CoolNet de Netafim (configuration T à 2 buses, buses grises ayant un débit de 7,5 L /heure pour une pression de 4 à 5 bars).
  - La pression dans le réseau de brumisation devra pouvoir être mesurée.
  - Un programmeur pilotant le fonctionnement du système de brumisation pour des durées de l'ordre de quelques dizaines de secondes à quelques minutes pour des intervalles de quelques minutes à dizaines de minutes.
  - Un procédé de chauffage de l'eau brumisée permettant d'atteindre si nécessaire une température de 23°C avec une régulation du fonctionnement à 1°C près et une programmation jour / nuit. La source d'énergie sera l'électricité.
  - Un procédé d'aération ou d'oxygénation de l'eau brumisée pour permettre la saturation de l'eau en oxygène dissous pour la gamme de températures utilisées (soit 8-9 mg d'O<sub>2</sub> dissous /L d'eau à 22-23°C). Cette fonction fera l'objet d'un fonctionnement programmable dans le temps mais ne sera pas régulée à partir d'une mesure de la concentration en O<sub>2</sub> dissous dans l'eau.
  - Un procédé de régulation du pH de l'eau par la possibilité d'injecter ou non une solution d'acide ou de base pour corriger le pH de l'eau brumisée en fonction du pH mesuré.
  - Un procédé d'injection d'une solution nutritive dans l'eau avec une régulation de l'injection en fonction d'une mesure de la conductivité électrique (EC) de l'eau brumisée.
  - Un compteur d'eau à l'entrée du stockage d'eau.
  - Un compteur mesurant la totalité de la consommation d'électricité du procédé de bouturage.
  - Une gestion des alarmes en cas d'arrêt du système de brumisation.

Au niveau du projet, 2 approches sont explorées pour la conception de dispositifs d'aéroponie pour le bouturage : soit des dispositifs relativement techniques avec plus de maîtrise des paramètres environnementaux (ce qui est recherché au CATE), soit des dispositifs où moins de paramètres environnementaux sont maîtrisés (exemple du prototype de PLFP sauf pour le rôle de l'éclairage qui reste à étudié ou au CDHRC).

## **Tâche 1.2. : Construction de dispositifs pilotes pour une production à grande échelle**

### **1.2.1 : Dispositif pilote du CATE**

A la suite de la 1<sup>ère</sup> étape de conception qui a été mise en œuvre fin 2022 et début 2023, un dispositif de bouturage par aéroponie a été mis en place à la station du CATE dans le cadre de ce projet.

La construction d'un dispositif pilote a démarré au cours de l'année 2023. Cette construction a été réalisée par l'entreprise Premel Cabic (29, <https://www.premel-cabic.fr>) en prestation de service pour le compte du CATE à partir du cahier des charges établi précédemment. Le prototype opérationnel a pu être mise en service au CATE en novembre 2023, soit avec plusieurs mois de retard par rapport au planning prévisionnel du projet. Le prototype est décrit plus précisément dans les paragraphes suivants. La figure n°1 illustre cette description.

La table de bouturage a été construite en inox. D'une surface de 5 m<sup>2</sup> (1,03 m x 5 m), elle présente :

- Un bac de 25 cm de hauteur dans lequel le système de brumisation est installé et où l'eau est récupérée en partie basse. Les buses de brumisation sont positionnées 10 cm sous les plaques d'insertion et de maintien des boutures. Le système de brumisation est constitué de 4 rampes réparties tous les 40 cm sur la largeur de la table et supportant des buses Coolnet Pro de Netafim (configuration T à 2 buses, buses grises ayant un débit de 7,5 L /heure pour une pression de 4 à 5 bars).
- Dans la partie supérieure du bac, des bordures adaptées avec des cornières pour supporter et caler les dispositifs d'insertion et de maintien des boutures et les capots de confinement des parties aériennes. La table de bouturage faisant 1,08 m de largeur, il est possible d'y disposer 2 rangées de dispositif d'insertion de 53 cm chacun de large.

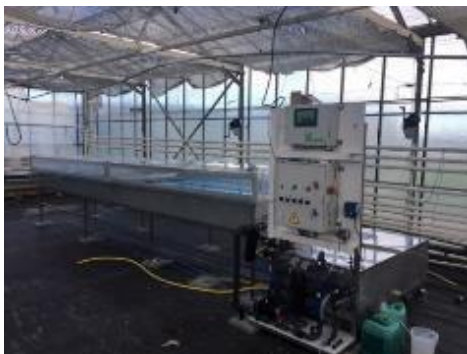
- Des rebords prévus pour positionner de l'isolant en dessous et sur les côtés du bac. L'isolant retenu est constitué de plaque de Styrodur de 8 cm d'épaisseur. Il est posé sur le fond et les cotés de la table de bouturage.
- Des pieds positionnant les supports de boutures à une hauteur de 950 cm. Il aurait été nécessaire de prévoir des pieds à hauteur réglable.

Une fois installés, les dispositifs d'insertion et de maintien des boutures délimitent en partie inférieure, le compartiment racinaire qui est brumisé, maintenu à l'obscurité et où les racines des boutures sont destinées à se développer et le compartiment supérieur où les parties aériennes se situent à la lumière, dans un espace qui peut être confiné par des capots transparents soulevables. Pour la surface non occupée de la table de bouturage par des dispositifs accueillant des boutures, des plaques de Comacel (PVC expansé) de 10 mm d'épaisseur et d'une surface de 53,5 cm x 50 cm sont utilisées afin de conserver une séparation entre les compartiments racinaires et le compartiment des parties aériennes et que la brumisation ne vienne pas humidifier le feuillage des boutures présentes à côté.

Pour préserver l'hygrométrie au niveau des parties aériennes des boutures, 2 capots de confinement ont été construit en polycarbonate rigidifié par des cornières en aluminium et viennent se poser sur les bords de la table de bouturage. Des poulies permettent de les soulever.

L'inox a été retenu pour la table de bouturage dans ce projet malgré son coût, du fait de la surface limitée de l'installation, de sa solidité, de sa durabilité, des possibilités de nettoyage, de la possibilité de constituer une surface plane en fond de bac pour ne pas accumuler d'eau. Pour une surface plus importante, il serait nécessaire de réfléchir à l'utilisation d'un autre matériaux moins couteux.

Figure n°1 : prototype de dispositif d'aéroponie mis en place au CATE dans le cadre du projet RAcin'Air pour le bouturage des végétaux d'ornement. Photographie n°1 à 11.



Photographie n°1



Photographie n°2



Photographie n°3

Photographie n°1 : vue générale du dispositif d'aéroponie installé au CATE pour le bouturage des végétaux ornementaux. Il est composé d'une structure de 5 m² servant à supporter les dispositifs d'insertion des boutures et permettant la brumisation des parties racinaires (partie gauche), d'une réserve d'eau (partie droite, en bas) et d'une unité de gestion, pompage et traitement de l'eau brumisée (partie droite, devant). Photographie n°2 : Vue générale du dispositif après isolation par du Styrodur (plaque de mousse de polystyrène rigide extrudée) de 80 mm d'épaisseur.

Photographie n°3 : table porteuse avec vue sur le système de brumisation sous les plaques et le système de confinement des parties aériennes soulevé en hauteur.



Photographie n°4



Photographie n°5



Photographie n°6

Photographie n°4 : table de bouturage avec système de confinement des parties aériennes en place.

Photographie n°5 : table de bouturage qui supporte des plaques d'insertion et de maintien des boutures en place et système de brumisation du compartiment racinaire en dessous.

Photographie n°6 : vue du dessous d'une plaque d'insertion et de maintien des boutures. La base des boutures est visible et le système de brumisation est en fonctionnement.

La réserve d'eau pour la brumisation a également été fabriquée en inox. D'un volume de 300 L, elle permet d'avoir un fonctionnement en circuit fermé. L'eau brumisée non absorbée par les boutures retourne dans la réserve d'eau et est réutilisée. Lorsque le niveau d'eau baisse dans la réserve, un flotteur commande une vanne de remplissage. Un compteur permet de comptabiliser l'eau réintroduite dans le système. Cette réserve dont l'eau peut être chauffée est également isolée par des plaques de Styrodur de 8 cm d'épaisseur sur le dessus et les cotés.



Photographie n°7

Photographie n°8

Photographie n°7 : réserve d'eau d'environ 300 L pour la brumisation en circuit fermé (avant isolation).  
 Photographie n°8 : Vue de la réserve d'eau avec flotteur pour la mise à niveau du volume d'eau, la sonde chauffage électrique de l'eau, l'arrivée d'air pour le bullage, les arrivées d'acide pour la correction du PH et d'engrais si nécessaire. Le retour d'eau de la table de bouturage est visible ainsi qu'un bouchon de vidange.



Photographie n°9

Photographie n°10

Photographie n°11

Photographie n°9 : Armoire de commande et de régulation et automate Ridder à écran tactile pour la gestion du chauffage de l'eau, des brumisations, du pH et de l'EC de l'eau brumisée ainsi que pour la gestion des alarmes.  
 Photographie n°10 : pompage, filtration, mesure pression, retour d'eau, injection d'acide et d'engrais.  
 Photographie n°11 : Armoire de commande avec sécurité électrique, compteur électrique, commande de la pompe à air.

En fonction d'une consigne entrée au niveau du système de régulation, l'eau destinée à la brumisation peut être chauffée par un thermoplougeur électrique. Elle peut également être corrigée au niveau de son pH grâce à un procédé d'injection régulé. De l'engrais peut aussi être injectée si nécessaire grâce à un module de régulation et d'injection. La mesure du pH et de l'EC se font dans un circuit d'eau pompée. Par ailleurs, une pompe à air injecte de l'air dans l'eau de façon à saturer sa concentration en oxygène. Son fonctionnement est basé sur un programmateur horaire sans mesure. Pour éviter le bouchage des buses de brumisation, l'eau est filtrée par deux filtres à lamelle, un de 120  $\mu$  et un de 55  $\mu$ . La pompe est équipée d'un variateur de fréquence. La pression de l'eau est mesurée par un manomètre. Une vanne manuelle permet de modifier le retour d'eau à la réserve.

L'automate Ridder gère par ailleurs un certain nombre d'alarme : manque d'eau, EC ou pH trop élevée, Température inadaptée avec ou sans poursuite du processus. Une alarme lumineuse se met en route en cas de panne du dispositif. En cas de panne du système de pompage, une fonction de sécurité permet la poursuite des brumisations par un branchement sur l'eau du réseau.

### **1.2.2 : Dispositif pilote de PLFP**

La station de PLFP a conçu un dispositif à plusieurs étages en hauteur afin d'utiliser une faible surface au sol (1m<sup>2</sup>) tout en garantissant un nombre de boutures intéressant pour être transférables chez les professionnels (Fig. n°2 et 3).



Figure n°2 : Dispositif de multiplication à étages mis en place à PLFP

Un roll destiné au stockage des fromages a servi de squelette pour ce module. Il a ensuite été modifié et équipé selon les objectifs du projet. Une cuve de réserve d'eau en inox a ainsi été ajoutée sous le dispositif ainsi que le système d'irrigation permettant d'apporter l'eau vers les asperseurs situés dans les 4 étages. Ces dernières peuvent chacune accueillir 300 boutures. Ce nombre est dépendant du système de support mis en place (voir *b) Le système de support pour les boutures*). La gestion des paramètres d'aspersions se fait grâce à un tableau de contrôle permettant d'enregistrer les consignes : durée et fréquence d'aspersion, température de l'eau et durée de l'éclairage. En effet, afin de pallier l'ombre portée par les étages supérieurs, des ampoules LED, agissant dans le spectre visible et la lumière bleue, ont été installés à raison d'une LED de lumière bleue toutes les 4 LED d'éclairage (soit un total de 108 LED bleues par étage).

Des alertes automatiques sont également programmées en cas de défauts techniques du dispositif (défaillance sondes, niveau d'eau bas dans la cuve, pression insuffisante, ...).

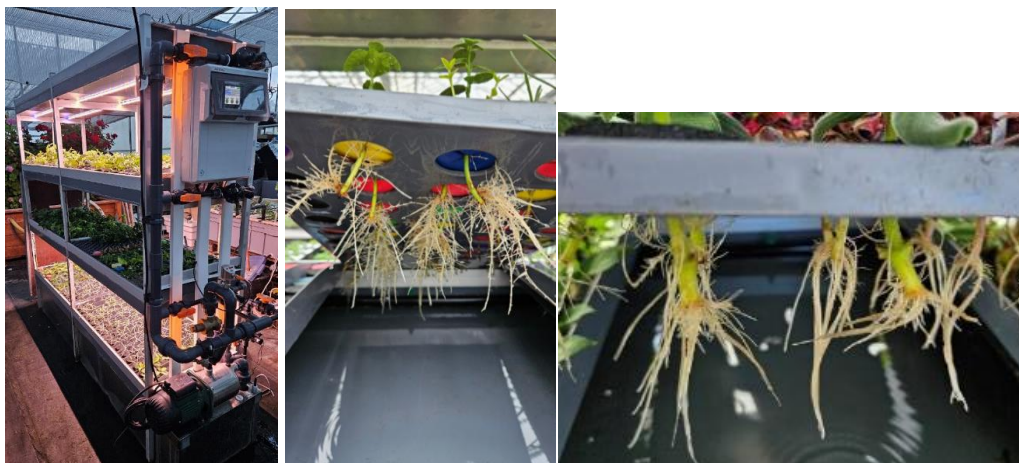


Figure n°3 : Système de bouturage par aéroponie avec LED et supports de boutures avec boutures enracinées

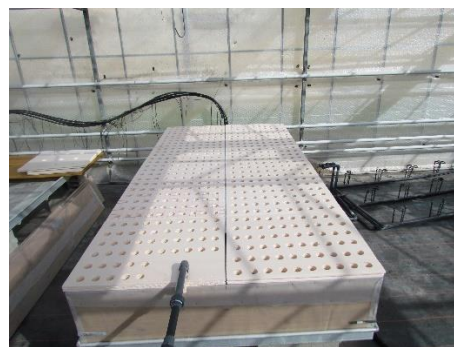
La cuve en inox a une capacité totale de 240L d'eau qui est maintenue à une température de 22°C grâce à un chauffage submersible. La pompe utilisée pour acheminer l'eau dans les tuyaux possède un débit de 4.8m<sup>3</sup>/h. Des électrovannes situées à l'entrée de chaque étage régulent le débit et paramètrent indépendamment les 4 étages de multiplication. Une brumisation de 15 secondes toutes les 15 minutes est ensuite effectuée au niveau de la tige des boutures. Des buses de 75L/h sont utilisées à cet effet. Cet espace est confiné (photo ci-dessous) ce qui limite l'évaporation de l'eau et maintient l'humidité au contact des racines. Un trou de vidange a été réalisé dans le fond de chaque étage afin de reverser le trop plein d'eau vers la cuve en inox. Le dispositif est donc réfléchi en circuit fermé pour limiter la perte.

### **1.2.3 : Dispositif pilote au CDHRC**

Dans un premier temps, en 2023 et 2024, le CDHR a exploité un dispositif d'aéroponie de conception proche de celui utilisé au cours du projet X-Aéroponie mais de dimension supérieure (Figure n°4).

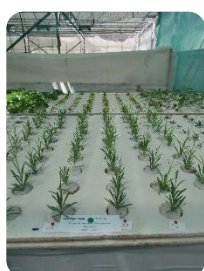


Figure n°4 : Procédé du type X-Aéropono



Procédé utilisé en début de projet Racin'Air

Ce procédé est basé sur l'utilisation de plaques de support avec des trous où les boutures sont maintenues par de la mousse. Ce procédé permet un bon maintien des boutures et une accessibilité aisée des boutures mais le temps d'insertion et de récolte des boutures est trop long. Avec ce dispositif, le temps de brumisation est de 30 secondes toutes les 3 à 5 minutes. Cette structure n'est pas mobile. La densité de départ étant moyenne, elle a été augmentée en cours du temps (figure n°5).



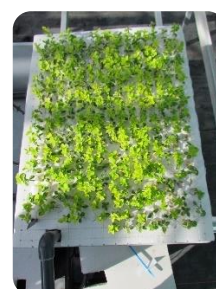
Lavandes et fusains  
à 125 boutures /m<sup>2</sup>



**Augmentation de la densité des boutures**



Lavandes et fusains  
à 687 boutures /m<sup>2</sup>



Pelargonium  
à 125 boutures /m<sup>2</sup>



Pelargonium  
à 320 boutures /m<sup>2</sup>

Figure n°5 : Augmentation de la densité de boutures en aéroponie

Ensuite, en 2025 un deuxième dispositif a été conçu avec des automatismes plus importants pour limiter l'entretien du système (figure n°6)



Dispositif CDHR n°2. Installation en 2025

Armoire de regulation et commande

Réserve d'eau pour la brumisation

Table de bouturage

Ajustement EC et PH (par Dosatron)



Table de bouturage - vue du dessus



Vue du dessous (du compartiment racinaire)

Figure n°6 : nouveau dispositif d'aéroponie utilisé pour le bouturage des végétaux par le CDHRC à partir de 2025

Les dimensions de la table de bouturage sont : 3 m de longueur x 1,5 m de large, soit 4,5 m<sup>2</sup>.

Ce prototype bénéficie :

- D'une automatisation de la brumisation (avec une base de 30 secondes de fonctionnement toutes les 5 minutes).
- D'un remplissage semi-automatique de la réserve d'eau avec alarme de niveau.
- D'une automatisation de la régulation du pH et de l'EC de l'eau brumisée.
- La table de bouturage est mobile.

Pour la brumisation des parties racinaires des boutures, un dispositif d'arrosage avec des jets à lame Bars est utilisé.

Des économies d'échelle sont possible car la station de stockage, de pompage et de traitement de l'eau peut fonctionner pour une table de bouturage nettement plus importante.

A l'usage, il apparait que la table de bouturage doit être conçue pour accueillir des supports de boutures de 50 à 60 cm de long et non d'1,5 m comme c'est le cas ici afin de faciliter les manipulations.

#### **1.2.4 : mise au point de procédés pour l'insertion et la récoltes des boutures**

Différents procédés d'insertion et de maintien des boutures ont été étudiés dans ce projet par les stations CATE, CDHR et PLFP ainsi que leur intégration sur le dispositif d'aéroponie.

Pour l'insertion et le maintien des boutures, le procédé de référence (**procédé n°1**) est constitué de plaques présentant des trous dans lesquels les boutures sont insérés et calés avec de la mousse (figure n°7). Ce procédé permet un bon maintien des boutures et fonctionne bien au niveau de l'enracinement. Mais, le temps d'insertion des boutures à la mise en place et de récolte des boutures enracinées est beaucoup trop long pour une transposition industrielle du procédé. De plus, la densité n'est modulable que par le changement de plaques trouées différemment.



Figure n°7 : Procédé de référence (procédé n°1) pour l'insertion et le maintien des boutures en aéroponie (photo de gauche : vue supérieure de la plaque dans le compartiment des parties aériennes, photo de droite : vue de la partie inférieure de la plaque dans le compartiment racinaire).

Ces plaques sont fabriquées en Comacel (PVC expansé) de 12 mm d'épaisseur et de 53,5 cm de longueur pour 50 cm de largeur. Les morceaux de mousse de polyéthylène blanc sont découpés dans des plaques de 2,5 cm d'épaisseur.

La figure n°8 présente des applications correspondant à l'utilisation de ce type de procédé, vu du dessus, au niveau des parties foliaires et du dessous, lorsque des boutures sont enracinées. Les boutures sont positionnées dans un premier temps dans un morceau de mousse fendu qui est ensuite placé dans un des trous de la plaque.



Figure n°8 : insertion et maintien des boutures par le procédé de plaques trouées (procédé n°1).

Pour ce procédé, 2 densités ont été utilisées selon la taille des boutures et de leurs feuilles, soit 448 boutures /m<sup>2</sup> pour des trous de 3 cm de diamètre, soit 888 boutures /m<sup>2</sup> pour des trous de 2 cm de diamètre. En fin de processus, l'enracinement des boutures ne doit pas être trop important pour pouvoir sortir les boutures de la plaques enracinées sans abîmer les racines.

### Dispositifs mis en place par PLFP

Deux systèmes de support dérivant du procédé précédent ont été testés par PLFP durant le projet : des plaques déplaçables avec supports en mousse et une plaque créée à partir d'air-pot.

- Plaque déplaçable avec supports en mousse posé

Des plaques contenant 5 rangées de 10 trous, espacés de 5cm (centre à centre), sont placées sur la largeur du dispositif grâce à des encoches. Les trous ont un diamètre de 3.5cm par conséquent des inserts en mousse sont utilisées pour maintenir les boutures en place. Mais, à la différence du procédé précédent, les mousses sont seulement posées sur les plaques et non insérés dedans (figure n°9). Avec ce système, 300 boutures sont réalisées par étage.

Les avantages de ce système :

- Les plaques sont manipulables aussi bien pour du déplacement ou l'observation du système racinaire,
- Les inserts en mousse peuvent accueillir tous types de boutures, quel que soit le diamètre de la tige,
- Les mousses ne blessent pas les boutures,
- L'espacement des trous favorise l'état sanitaire des végétaux grâce à la circulation de l'air.

Les inconvénients :

- Le nettoyage des mousses est nécessaire entre différentes séries de boutures pour éviter la prolifération d'algues,
- Nécessite un temps de mise en place des boutures dans les inserts en mousse.



Figure n°9 : supports avec mousses posées (PLFP)

- Plaque en air-pot

Pour ce 2ème procédé testé par PLFP, des parois des pots air-pot ont été utilisés. Elles comportent des cônes ouverts vers l'extérieur qui ont pour objectif d'éviter les phénomènes de chignognage des racines. Ce dispositif en 3 dimensions est composé de 8 rangées de 12 trous d'un diamètre de 0.7cm. Mis à plat et utilisé comme support pour l'aéroponie, les boutures sont maintenues sur le procédé grâce à leur feuillage (figure n°10). Chaque

bouture est espacée de 3.5cm permettant un passage d'air tout en ayant une surface et une densité acceptable pour le bouturage.

Les avantages de ce système :

- Rapidité de mise en place des boutures,
- Pas de blessures des boutures car elles ne sont pas étreintes,
- Possibilité de disposer 576 boutures par étage.

Les inconvénients :

- Ne convient pas à toutes les espèces végétales sous peine de glisser du trou,
- La plaque est semi rigide donc à manipuler avec précaution.



Figure n°10 : photographie de support en plaque air-pot utilisés pour le bouturage d'un arbuste.

## Nouveau principe de fonctionnement imaginé pour les supports des boutures en aéroponie (CATE & CDHRC) :

Afin de diminuer plus fortement les temps de travaux, un nouveau principe de fonctionnement pour la mise en place et le maintien des boutures dans le dispositif d'aéroponie a été imaginé. Il consiste à alterner les bandes supports de boutures et des bandes intercalaires sur la table de bouturage afin de permettre de brumiser la base des boutures dans le compartiment racinaire (figure n°11). Les bandes supports sont chargées de boutures en atelier sur une table de travail où les boutures sont préparées comme c'est le cas pour la méthode de bouturage sur substrat. Le temps de travail devrait ainsi pouvoir être relativement mieux maîtrisé.

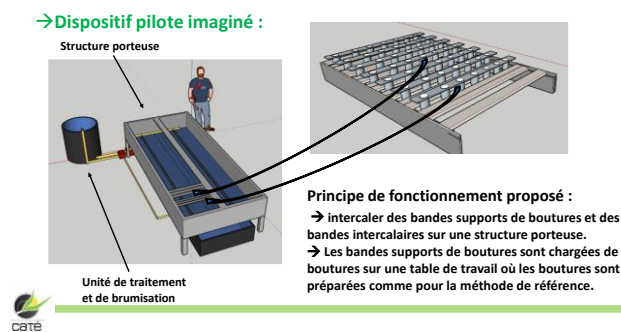


Figure n°11 : principe de fonctionnement général proposé

Aussi, pour se substituer à la méthode de référence, 2 procédés ont d'abord été envisagés dans un premier temps et testés au CATE. Ces procédés sont :

- **Procédé n°2** : il s'agit d'utiliser le procédé « **autostyx Strip** » de Visser – Viscon et observer s'il peut être adapté pour le bouturage en aéroponie. Ce système a été conçu par Visser – Viscon pour la mécanisation du repiquage de boutures non racinées en motte de culture ou en pot par des robots de repiquage (figure n°12). Lors de la récolte des boutures sur les pieds mères, celles-ci sont disposées par le multiplicateur sur les bandes (strip) conçues spécialement pour les accueillir. Elles sont expédiées en colis adaptés aux producteurs qui possède un robot de repiquage. Les boutures ne sont pas cultivées sur le strip, il sert surtout à faciliter la préhension des boutures par les pinces du robot lors du repiquage. Pour cela, chaque élément du strip est sécable. Biodégradable, il est enterré dans le substrat avec la base de la bouture lors du repiquage. Ce système fonctionne pour les espèces qui s'enracinent très rapidement et pour des boutures de taille réduite. L'espace entre les boutures sur le strip est très réduit. La bande intercalaire qui est posée entre chaque ligne de

support de boutures est fabriquée en comacel d'1,2 cm d'épaisseur et de 4 cm de largeur pour une longueur de 53,5 cm.



Figure n°12 : Procédés n°2 d'insertion des boutures. Utilisation du système AutoStix Strip de Visser - Viscon. Photo Visser-Viscon.

Les bandes Autostyx Strip ne sont pas prévue pour être portée dans notre dispositif. Aussi, pour ce procédé, des petits clips à insérer dans quelques alvéoles du Strip ont été fabriqué par imprimante 3D pour qu'elles soient maintenue par les bandes intercalaires voisines lorsqu'elles sont chargées de boutures (figure n°13)

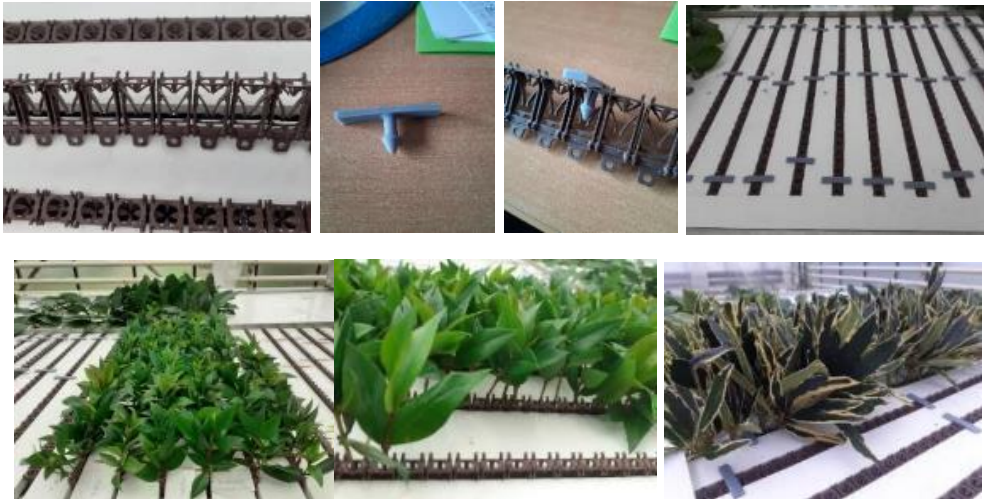


Figure n°13 : insertion et maintien des boutures par le procédé Autostyx strip de Visser-Viscon (procédé n°2).

Avec des plaques intercalaires de 4 cm de large, la densité de boutures obtenue est de 928 boutures /m<sup>2</sup> pour le modèle autostyx de 15 mm x 15 mm x 35mm (en plaçant 28 boutures par strip) et de 1913 boutures /m<sup>2</sup> pour le modèle 8 mm x 9 mm x 30 mm (avec 48 boutures par strip). Ces densités sont très élevées et nécessite de laisser des espaces vides sur les strip.

- **Procédé n°3** : c'est un procédé « maison » élaboré en impression 3D. 2 versions ont été fabriquées (Figure n°14). Seule la version 2 a été retenue pour la suite des tests car les boutures sont plus faciles à insérées et sa fabrication plus simple que pour la version n°1. L'effet ressort des lamelles permet de bloquer suffisamment les boutures dans l'encoche prévu à cet effet. La matière plastique utilisée doit à la fois être suffisamment rigide pour que la bande d'insertion ne ploie pas sur sa longueur lorsqu'elle est placée sur la structure porteuse et légèrement élastique pour que les lamelles jouent leur rôle de ressort. La bande intercalaire doit par contre être adaptée pour venir refermer les espaces entre les deux.

Les dimensions sont les suivantes : longueur totale : 53,5 cm, hauteur : 1,5 cm, épaisseur : 3 mm, longueur des lamelles : 2 cm, épaisseur des lamelles : 1 mm.

La bande intercalaire qui est posée entre chaque support de bouture est fabriquée en comacel d'1,2 cm d'épaisseur et de 4 cm de largeur. Des loges sont découpées dans la bande intercalaire pour que les boutures prises entre les lamelles puissent y être insérées en laissant le moins d'espace possible entre les rangées successives.



Figure n°14 : Procédés n°3 d'insertion des boutures. Prototypes fabriqués au CATE par impression 3D.

A gauche : version n°1. Au centre : version n°2 vue de détail et vue d'ensemble.

La figure n°14 montre ce procédé chargé en bouture et le rôle de la bande intercalaire venant enserrer la bande de lamelles supportant les boutures.



Figure n°15 : insertion et maintien des boutures par le procédé de prototype imprimé en 3 D (procédé n°3).

Les procédés n°2 et 3 sont positionnés directement sur les bordures de la table de bouturage. Bien que cela aurait été possible, ils n'ont pas été disposés dans un système de plaques intermédiaires permettant de bénéficier d'un effet plaque pour observer plus facilement les racines sous les plaques et faciliter la récolte des boutures enracinées.

Un autre procédé a ensuite été mis au point en 2025 au CATE à la suite des premiers tests réalisés, le **Procédé n°4 - structure mousse-cornière dans un cadre**. C'est également un procédé « maison » fabriqué en interne. L'unité de base est constituée d'une bande de mousse de 51 cm de long et 3 cm de large collée sur une cornière en PVC de 52 cm de long (Figure n°16). Dans les bandes de mousse, des fentes sont découpées tous les 3,6 cm pour insérer les boutures. La cornière supporte la bande de mousse voisine et assure une rigidité suffisante sur la longueur pour disposer les unités de base sur un cadre intermédiaire permettant d'obtenir un système comparable à une plaque de bouturage.



Figure n°16 : procédé n°4 d'insertion des boutures. Fabrication CATE - 2025. A gauche : unité de base. Au centre : détail. Les boutures viendront s'insérer dans les fentes découpées dans la mousse. A droite : chaque module est destiné à être posé à touche-touche sur la table porteuse ou dans un cadre adapté pour un usage comparable à une plaque de bouturage.

La mousse est une mousse de polyéthylène réticulé de 1,5 cm d'épaisseur et de 29 kg /m3 de densité, à cellules fermées, étanches à l'eau et à l'air, expansée à l'azote, lavable, de couleur anthracite. Marque : Plastazote LD29 (Distributeur : Vexi). Les cornières sont en PVC blanc de 15,5 mm x 15,5 mm. La colle utilisée est une colle PVC. Le cadre pour un usage comparable à une plaque de bouturage fait 53,5 cm de long pour 40 cm de large. Il est construit en Comacel de 12 mm d'épaisseur et fait 40 mm de haut.

Le positionnement des boutures dans ce procédé est présenté figure n°17. Les boutures sont mises en place dans les fentes de chaque structure de base prise séparément (Chaque structure de base correspondant à une ligne de mousse et une cornière) avant que cette dernière ne soit assemblée en plaque, celle-ci étant alors posée sur la table de bouturage. Avant la pose sur le dispositif d'aéroponie, les différentes opérations peuvent être réalisées en atelier de bouturage.



Figure n°17 : insertion et maintien des boutures par le procédé mousse-cornière dans un cadre (procédé n°4).

Pour un espacement de 3,6 cm entre boutures et une largeur des bandes de mousse de 3 cm, la densité de boutures s'établit à 868 boutures /m<sup>2</sup>. En comparaison, la production de jeunes plants en alvéole de Ø3 cm en plaque de 104 avec des plaques de 31,2 cm x 50,4 cm aboutit à une densité de 661 boutures /m<sup>2</sup>.

Une fois enracinée, les boutures peuvent être sorties facilement du procédé en sortant les plaques du dispositif d'aéroponie puis en défaisant les bandes de mousse des plaques. Les boutures enracinées sont alors accessibles facilement.

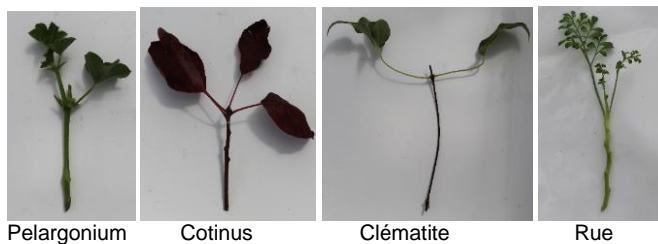
Parallèlement, un autre procédé a également été testé en 2025 au CDHRC, **le procédé n°5, basé sur l'utilisation de joints d'étanchéité de bas de porte en brosse pour porte industrielle** (Figure n°18).

Ce système permet d'adapter facilement la densité des boutures à leur dimension (figure n°19). Les boutures sont bien maintenues et facile à insérer et récolter. La table de bouturage doit cependant être adaptée pour accepter des supports qui ne soient pas trop longs (50 à 60 cm de long semble idéale) car des supports trop longs sont difficile à manipuler un fois qu'ils sont chargés de boutures.



Figure n°18 : Dispositif du CDHRC de 2025. Supports de boutures pour le bouturage par aéroponie en joints d'étanchéité de bas de porte en brosse pour porte industrielle. Vue de dessus et vue de dessous

Exemples d'espèces pour une densité modérée de 1000 à 1500 boutures /m<sup>2</sup> sur la table de bouturage



Boutures de Pelargonium à 1 300 boutures /m<sup>2</sup>

Exemples d'espèces permettant d'avoir une Forte densité sur la table de bouturage (2000 boutures /m<sup>2</sup>)



Boutures de lavande à 2 000 boutures /m<sup>2</sup>

**Tâche 1.3. : Evaluation du dispositif pilote et de l'itinéraire de bouturage.**

L'évaluation du dispositif a démarré dans la foulée. Plusieurs aspects ont été évalués fin 2023, en 2024 et en 2025 et sont présentés dans ce chapitre :

- L'ergonomie et l'adaptation des procédés d'insertion et de récolte des boutures ainsi que leur intégration dans le dispositif d'aéroponie.
- Le fonctionnement du prototype : fonctionnement des équipements de brumisation et de traitement de l'eau, des équipements de régulation, de contrôle-commande, d'alarme.
- Les consommations en intrants.
- La réussite du bouturage et le comportement des boutures pour un certain nombre d'espèces d'arbustes.

Pour ces évaluations, des lots de boutures de différents taxons ont été mis en place dans le prototype d'aéroponie présenté précédemment.

**1.3.1 Ergonomie des procédés d'insertion et de récolte des boutures et intégration au dispositif d'aéroponie**

Les procédés d'insertion et de maintien des boutures n°1, 2 et 3 ont été testés en 2024. Le procédé n°4 n'a été testé qu'à partir du printemps 2025.

Les avantages et inconvénients de chaque type de support de boutures ont été décrits et sont présentés dans le tableau n°2.

Comme les procédés n°2 et 3, destinés au départ à remplacer le procédé n°1 n'ont pas donné satisfaction à l'issu des tests, le procédé n°4 a été imaginé et mis en place ensuite.

Comme déjà évoqué précédemment, le procédé n°1 (plaque trouée + callage par des morceaux de mousse) est facile à utiliser mais nécessite un temps trop long de mise en place et de récolte des boutures pour un usage à grande échelle. De plus, si l'enracinement des boutures est très fort et de type plagiotrope, la récolte des boutures est d'autant plus délicate pour ne pas abîmer les racines produites. L'effet plaque est intéressant, notamment pour les manipulations et le contrôle de l'enracinement en cours de processus.

Au niveau ergonomique et de l'intégration dans le dispositif d'aéroponie, le procédé n°2, basé sur l'utilisation de l'AutoStyx Strip s'est révélé mal adapté à l'usage recherché principalement pour les raisons suivantes :

- Les loges où sont insérées les boutures ne sont pas adaptés aux dimensions des boutures des taxons d'arbustes qui ont été testés. Ces dernières qui font généralement 4 à 6 cm de long, parfois 8 cm, avec des feuilles souvent assez larges, sont donc plus grandes que les boutures des espèces pour lesquelles la mécanisation du repiquage a été mise au point par le constructeur (*Geranium*, *Petunia*, *Verbena*...). Un talon à la base de la loge limite la partie des boutures présente dans le

compartiment racinaire. La surface où les racines pourraient apparaître est donc très restreintes sauf si on place les boutures de travers pour dépasser le talon. Dans ce cas, la bouture n'est pas bien maintenue.

- La bande AutoStix Strip est relativement souple sur la longueur. Une fois chargée en boutures, il devient difficile à manipuler et à poser sur le dispositif d'aéroponie, tout en cherchant en même temps à la caler avec une bande intercalaire.
- Les loges où sont insérées les boutures sont trop rapprochées les unes des autres. On peut ne pas insérer de boutures dans toutes les loges. Mais, chaque loge inutilisée est un espace par lequel l'humidité du compartiment racinaire vient mouiller le feuillage dans le compartiment supérieur et le sensibiliser à des bioagresseurs potentiels.
- La jonction des AutoStix Strip avec les bandes intercalaires n'est pas parfaite et des remontées d'humidité ont lieu du compartiment racinaire vers le compartiment des parties aériennes.
- Ce procédé doit être utilisé avec un cadre intermédiaire pour obtenir l'effet de plaque qui est recherché pour faciliter les manipulations.
- Ce procédé est protégé par des brevets et n'a pas été retravaillé pour apporter les modifications qui auraient été nécessaires à son adaptation.

En ce qui concerne le procédé n°3 basé sur la fabrication par imprimante 3D de supports de boutures à intégrer avec des bandes intercalaires adaptées, il apparaît également que ce procédé n'est pas optimal :

- Les boutures sont facilement posées entre les lamelles destinées à les supporter mais la pose ensuite de la bande intercalaire découpée qui vient se positionner en négatif des boutures est plus compliquée à mettre en œuvre. Si les découpes sont trop étroites, ce positionnement est encore plus délicat et à l'inverse, si elles sont trop large, la jonction est imparfaite.
- Les lamelles perdent de leur élasticité à l'usage et le maintien des boutures devient moins parfait au fur et à mesure des réutilisations.
- Pour des boutures dont le diamètre de tige est très fin ou très large, le maintien des boutures est imparfait.
- La jonction avec les bandes intercalaires est nettement améliorée par rapport au procédé n°2 mais n'est pas parfaite. Des remontées d'humidité ont tout de même lieu du compartiment racinaire vers le compartiment des parties aériennes malgré des interstices très étroits.

Les procédés n°2 et 3 n'ont donc pas été retenus pour la poursuite des essais. A partir du printemps 2025, le procédé n°4 a été utilisé et évalué.

Après quelques mois d'utilisation et plusieurs séries de boutures réalisées dans des conditions différentes, il apparaît que ce procédé est adapté au bouturage des arbustes en aéroponie et pourrait permettre de le faire à grande échelle. Les avantages de ce procédé par rapport au procédé n°1, 2 et 3 sont les suivants :

- Bon maintien des boutures.
- Adapté à des dimensions de boutures variables.
- La longueur de la partie introduite dans le compartiment racinaire peut être réglée comme nécessaire.
- La rigidité des bandes grâce à la densité de la mousse et au collage sur un cornière PVC permet une manipulation facile des structures de base lorsqu'elles sont chargées de boutures. Il n'y a de plus qu'un seul élément à manipuler et non deux comme pour les procédés n°2 et 3 (bande supportant les boutures + bande intercalaire).
- Absence de remontée d'humidité du compartiment racinaire brumisé vers le compartiment supérieur grâce à une mousse étanche et à l'absence d'interstice entre les structures unitaires. La bande de mousse d'une structure repose sur la base de la cornière de la structure suivante qui la soutient en même temps.
- Les structures de base sont faciles à fabriquer soi-même et les matériaux sont facilement disponibles.
- La densité des bandes de mousse peut être modifiée si nécessaire pour avoir une mousse un peu plus souple en fonction des boutures à travailler.
- Les structures de base constituées d'une bande de mousse accolée à une cornière PVC peuvent être facilement disposées dans un cadre de support intermédiaire avant d'être qu'eux-mêmes ne soient déposés sur le dispositif d'aéroponie. Cela permet de bénéficier d'un effet plaque facilitant la gestion pour la mise en place des boutures, le suivi de l'enracinement et la récolte des boutures enracinées.
- Pour adapter la densité de boutures, 2 solutions sont possibles : ne remplir qu'un espace sur 2 ou 3 (l'élasticité de la mousse referme la fente et empêche en principe les remontées d'humidité) ou fabriquer des structures de base avec des écartements différents.

**Procédés d'insertion et de maintien des boutures - comparaison des procédés**

Critères d'évaluation		Procédé n°1	Procédé n°2	Procédé n°3	Procédé n°4	Plaque de bouturage pour bouturage sur substrat
Fabrication des procédés	Simplicité de fabrication	Simple. Plaque de Comacel à découper et percer. Mousse à découper.	Moyen. Autostyx Strip disponible mais nécessite un clips de support. Plaque intercalaire à découper (découpe simple).	Plus compliqué car support des boutures fabriquée en impression 3D et découpe laser des bandes intercalaires	Simple. Support de boutures en mousse à découper et à coller au cornière PVC.	Achat uniquement
	Accès aux matériaux	Facile	Moyen. Nécessite fabrication de clips par impression 3D	Nécessite impression 3D capable de produire une structure longue	Facile	
	Possibilité d'autoconstruction	Oui	Oui	Partiellement	Oui	
	Coût du dispositif.					
Mise en place des boutures	Facilité de mise en place	Facile. L'insertion des boutures avec des morceaux de mousse dans les plaques est relativement aisée.	Moyen. Diamètre et profondeur des alvéoles de l'AutoStyx Strip pas forcément adapté à la diversité des formes et tailles des boutures testées. Une fois le strip chargé de boutures, la pose sur le dispositif d'aéroponie est plus délicate du fait de la souplesse du strip en l'absence de cadre de support intermédiaire.	Moyen. Boutures facile à mettre sur le support mais ensuite, la pose du support chargé de bouture dans les découpes de la bande intercalaire est plus compliquée. Mise en place et maintien plus compliqués si grosses boutures.	Facile. La mousse utilisée permet un positionnement facile des boutures sur la structure et assure une bonne tenue. Le cornière accolé à la bande de mousse assure une bonne rigidité au procédé qui facilite les manipulations. Le cadre intermédiaire permet un fonctionnement assimilable à une plaque de bouturage	Oui
	Temps de mise en place	Long	Amélioré mais insuffisant.	Amélioré mais insuffisant	Diminution significative du temps de mise en place des boutures par rapport au procédé de référence en plaque.	temps de référence
Contrôle de l'enracinement	Facilité de contrôle en cours de production	Facile. En soulevant les plaques. Facilité si poignée de préhension.	Compliqué en l'absence de cadre intermédiaire	Compliqué en l'absence de cadre intermédiaire	Compliqué en l'absence de cadre intermédiaire. Facile avec un cadre intermédiaire.	moyen
Récolte des boutures enracinées	Facilité de récolte des boutures enracinées et temps de récolte	La récolte des boutures enracinées est un peu plus compliquée, surtout si l'enracinement est fort. Temps de récolte relativement long.	Les racines sont prises dans l'autostyx qui est seccable plus ou moins facilement. Compliqué en l'absence de cadre intermédiaire. Nécessite un enracinement homogène du lot de boutures travaillé.	Récolte des boutures enracinées plus simple avec ce procédé. Facilité par un cadre intermédiaire. Nécessite un enracinement homogène du lot de boutures travaillé.	la récolte des boutures enracinées est nettement plus simple avec ce procédé et elle est encore facilitée avec un cadre intermédiaire. Le temps de récolte sera améliorée avec un enracinement homogène du lot.	Oui
Autres critères	Simplicité d'utilisation	Simple	Compliqué	Compliqué	Simple	Oui
	Densité de bouture /m <sup>2</sup>	448 à 888 boutures /m <sup>2</sup>	932 à 1913 boutures /m <sup>2</sup>	557 boutures /m <sup>2</sup>	868 boutures /m <sup>2</sup>	661 boutures /m <sup>2</sup>
	Maintien des boutures	Bon maintien	Moyen	Bon pour boutures de taille moyenne. Maintien moyen pour boutures très fines ou trop grosses.	Bon maintien	Bon maintien en général. Dépend de la profondeur de repiquage
	Adaptation par rapport à la diversité des boutures	S'adapte facilement	Moyen	Moyen	S'adapte facilement	S'adapte facilement
	Fuite entre compartiment racinaire et aérien (remontée d'humidité)	Non si les morceaux de mousses sont bien positionnés dans les trous. Bonne maîtrise de la difficulté en générale	Importante	Plus ou moins selon le type de bouture	Non. Bonne maîtrise de la difficulté.	Non concerné
	Possibilité de travailler en plaque	Oui	Oui mais nécessite un dispositif supplémentaire (cadre intermédiaire)	Oui mais nécessite un dispositif supplémentaire (cadre intermédiaire)	Oui mais nécessite un dispositif supplémentaire (cadre intermédiaire)	système de référence
Effet négatif sur réussite du bouturage	Non	Oui, des pertes importantes ont été observées avec les remontées d'humidité du compartiment racinaire. Des maladies se sont développés sur le feuillage de certaines espèces sensibles.	Oui, des pertes importantes ont été observées avec les remontées d'humidité du compartiment racinaire. Des maladies se sont développés sur le feuillage de certaines espèces sensibles.	Non	Nécessité de brumiser les parties aériennes. Risque d'asphyxie à la base des boutures.	

Tableau n°2 : Evaluation des procédés d'insertion et de maintien des boutures du CATE

Le temps de travaux associés à l'utilisation de chaque procédé d'insertion et de récolte des boutures en aéroponie ont été mesurés au cours de la réalisation de différents lots de boutures et comparés au bouturage sur substrat en plaque d'alvéoles (plaques e 104 alvéoles de Ø3cm). Ces données sont synthétisées dans le tableau n°3.

Etapes de production des boutures	Bouturage sur substrat - Mottes de culture Ø3 x 5 – plaque de 104 alvéoles	Aéroponie – Procédé n°1 – Plaques trouées	Aéroponie – Procédé n°2 – AutoStyx Strip	Aéroponie – Procédé n°3 – Support maison fabriqué par imprimante 3D	Aéroponie – Procédé n°4 – Bande de mousse + cornière dans cadre intermédiaire
Temps de repiquage – Mise en place des boutures	6 s	15 s	10 s	8 s	5 s
Temps de récolte – récupération des boutures enracinées avant empotage	2 s	10 s	8 s	6 s	2 s
Temps de travaux /bouture produite	36 s	60 s	50 s	43 s	34 s
Ecart en %		+ 67 %	+ 39 %	+ 19 %	- 5,5 %

Tableau n°3 : Evaluation des procédés d'insertion et de maintien des boutures en aéroponie – Temps de travaux pour le repiquage des boutures, pour la récolte des boutures enracinées en vue de l'empotage et temps total de travail /bouture pour différents procédés (en seconde /bouture).

Avec le procédé n°3, le temps de mise en place et de récolte des boutures n'est augmenté que de 19 % par rapport au temps de mise en place des boutures dans le système de référence en motte de culture (sur substrat) alors qu'il est augmenté de 67% avec le procédé de plaque trouée et de maintien des boutures par un morceau de mousse.

**Le procédé n°4 semble répondre à l'ensemble des contraintes d'ergonomie et d'intégration dans le dispositif d'aéroponie pour le bouturage des végétaux d'ornement à grande échelle. Pour l'instant, il n'existe pas de fournisseur proposant ce matériel prêt à l'emploi. A ce jour, ce procédé a été fabriqué en interne.**

### 1.3.2 Fonctionnement de la table de bouturage

En dehors des aspects d'ergonomie décrits précédemment, **les évaluations des procédés de support des boutures et du dispositif d'aéroponie ont permis de soulever plusieurs problématiques importantes qui ont influencé assez fortement l'enracinement des boutures** dans les essais de bouturage réalisés entre 2023 et 2025 :

- Les remontées d'humidité provenant du compartiment racinaire vers le compartiment foliaire du fait du fonctionnement de la brumisation sont une problématique importante à prendre en considération dans le fonctionnement du dispositif. Ces remontées sont liées aux procédés supportant les boutures et aux possibilités de passage qu'ils laissent entre les 2 compartiments. Elles ont été beaucoup trop importantes pour les supports de bouture n°2 et n°3 (Autostyx Strip et support en impression 3D). Des problèmes de maladies sont apparus sur le feuillage de certaines boutures du fait de ces remontées et ont entraînés des pertes non négligeables (sur Hydrangea, Perovskya et Caryopteris par exemple). Cette problématique n'avait pas été observée au cours du projet précédent (X-Aéropo) car un seul procédé pour supporter les boutures avait été testé (le procédé n°1 avec des plaques trouées). Le procédé de brumisation a également été modifié et produit un brouillard plus fin. Il s'agit ici de buses de brumisation alors que dans le précédent projet, il s'agissait de buses de micro-aspersion produisant des gouttes plus grosses mouillant la base des boutures sans faire de brouillard.
- Une inadaptation du capot de protection destiné à protéger les parties aériennes des boutures de la déshydratation a également été observée. Imaginé au départ pour créer un confinement des boutures, il a été construit en plexiglass, d'un trop faible volume, de forme plate. Ce type de capot a produit des climats inadaptés pour les boutures. En période ensoleillée, le rayonnement direct et les températures étaient trop fortes avec des hygrométries trop basses entraînant un stress des boutures. En période plus froide, de fortes condensations apparaissaient qui gouttaient sur le feuillage, en accentuant les problèmes de maladies. Ce phénomène de condensation lié à des parois froides, a été accru par le fait que la serre n'était pas chauffée alors que le dispositif d'aéroponie l'était. Cette problématique a également entraîné des pertes importantes. Aussi, en 2005, un 2ème type de capot a été construit pour remplacer le 1<sup>er</sup> modèle. Formé d'un film en polyéthylène de couverture d'abri traité anti-condensation et porté par une structure triangulaire, il apparaît mieux adapté. Mais, la question reste ouverte de savoir si l'utilisation d'un capot de protection pour produire un certain confinement des boutures et limiter leur déshydratation est

systématiquement nécessaire ou dans quelles conditions l'utiliser. La réponse est influencée par le contexte. Ce capot ne doit pas créer de condensation susceptible de retomber sur le feuillage et d'accentuer le risque de maladie. Or, l'apparition de condensation sera fonction des écarts de températures entre l'intérieur et l'extérieur du compartiment et donc en fonction du climat de l'abri dans lequel est installé le dispositif d'aéroponie et de la température de chauffage de l'eau brumisée utilisée dans le dispositif d'aéroponie.

En période hivernale dans un abri non chauffé, le capot permet aussi de garder plus de chaleur au niveau des parties aériennes des boutures et limite les déperditions du compartiment racinaire si l'eau brumisée est chauffée.

En période estivale, il a déjà été montré dans le projet X-Aéroponie que la fait d'utiliser un capot de protection lors du bouturage en aéroponie permettait d'améliorer le comportement et d'éviter le flétrissement de boutures de Lavandes. Mais, le confinement n'était pas total. On observe également qu'il n'est pas forcément utile toute l'année, notamment en période intermédiaire où les températures ne nécessitent pas des besoins de chauffage trop élevé et où l'hygrométrie n'est pas trop limitante pour les boutures.

La conception et l'utilisation de cet outil doit être améliorée et optimisée. De même, il apparaît important de connaître et adapter le comportement thermique et climatique de l'abri dans lequel le dispositif de bouturage par aéroponie est installé. L'ombrage de l'abri en période estivale interfèrera aussi avec le fonctionnement de dispositif d'aéroponie.

- L'adaptation de la durée et de la fréquence des brumisations en fonction du climat est également un point à prendre en considération. Les références retenues depuis le début du projet ont été de déclencher des brumisations de 30 secondes dans le compartiment racinaire toutes les 3 minutes. Mais, au cours de l'été 2025, où les températures ont été très élevées, cette durée de brumisation a été trop courte et la série de boutures en cours a souffert d'un manque d'eau. Il aurait été nécessaire d'augmenter cette durée à 1 ou 2 minutes de fonctionnement toutes les 3 minutes, au moins pendant les heures les plus chaudes de la journée ou de brumiser en continu.
- L'apparition d'un biofilm d'origine bactérienne sur la base de certaines boutures provoquant leur embolie et leur dépérissement (*Griselinia*, *Olearia*, *Rhododendron*) a également été observée. Ce biofilm provoque aussi le bouchage des filtres. Il a été nécessaire de mettre en place une désinfection de l'eau. Après plusieurs tests, la désinfection au peroxyde d'hydrogène a été retenue en apportant une à deux fois par semaine 2,8 g de peroxyde d'hydrogène dans la réserve d'eau de 300 L (soit 8 ml de produit commercial à 35% d' $H_2O_2$  pour 300 l d'eau afin d'obtenir une concentration de 8 ppm d' $H_2O_2$ ).

**L'ensemble des difficultés rencontrées lors de la mise en place du nouveau procédé de bouturage par aéroponie qui est rendue nécessaire par le changement d'échelle souhaité pour passer à une production semi-industrielle ou industrielle souligne l'importance de la question de l'alimentation hydrique des boutures.**

Dans le procédé de référence de bouturage dans du substrat, cette question est résolue :

- En maintenant les boutures dans un atmosphère saturé d'hygrométrie pour limiter le plus possible leur transpiration et donc leur déshydratation.
- En conservant une certaine réserve d'eau dans le substrat où est repiquée la bouture. Cette réserve est plus ou moins élevée selon le substrat choisi et est entretenue par des arrosages si nécessaire.

Mais, en contrepartie, le maintien en condition très humide favorise les bioagresseurs.

Dans le cas du bouturage par aéroponie, comme les parties aériennes des boutures ne sont pas maintenues dans une atmosphère complètement saturée en vapeur d'eau, le pouvoir évaporant de l'air entraîne une transpiration du feuillage et donc une demande en eau à la base des boutures. En début de processus, les boutures s'alimentent tout de même en eau malgré l'absence de racine. De l'eau est absorbée par la section de tige au niveau du point de coupe avant qu'un relais ne soit pris par les racines lorsqu'elles se seront reformées. On ne connaît pas l'état des stomates dans ce contexte mais, la transpiration au niveau des parties aériennes joue un rôle dans cette demande en eau.

Pour assurer un statut hydrique satisfaisant des boutures, il doit donc exister un équilibre entre :

- L'eau évaporée au niveau du feuillage et qui dépend de la surface foliaire et de paramètres climatiques (rayonnement solaire, température, vent, hygrométrie).

- La fourniture d'eau à la base des boutures par la brumisation dans le compartiment racinaire du dispositif. Avant l'apparition des racines, les boutures sectionnées peuvent capter de l'eau brumisée ou du moins, l'eau des gouttes qui se maintienne à la base des boutures.

Cet équilibre est à maintenir sur des pas de temps relativement courts puisqu'il n'y a aucune réserve d'eau dans le compartiment racinaire.

**Les observations réalisées montrent que cette problématique nécessite une prise en compte de l'ensemble des composantes du système de culture qui interviennent sur le statut hydrique des boutures et de leurs interactions pour assurer un fonctionnement hydrique des boutures satisfaisant :**

- Du fonctionnement du procédé de brumisation dans le compartiment racinaire (fréquence et durée de déclenchement, type de brouillard, rôle des gouttes d'eau qui se forme à la base des boutures en l'absence de racine). D'autres facteurs pourraient également intervenir sur la facilité de la bouture à capter l'eau dans le compartiment racinaire : forme de la coupe (à plat ou en biseau), diamètre des boutures.
- Un procédé de support des boutures qui ne laisse pas remonter l'humidité entre le compartiment racinaire et le compartiment des parties aériennes afin de maîtriser le risque de maladies.
- De la transpiration des boutures au niveau des parties aériennes en tenant compte des effets de l'enveloppe formée par le capot de confinement qui s'insère lui-même dans l'enveloppe d'un abri sur la demande climatique en eau. La surface de feuille des boutures intervient dans ce fonctionnement.

Le changement d'échelle entre le dispositif d'aéroponie expérimental utilisé au cours du projet X-Aéropo qui a initié ce travail et le dispositif pilote réalisé dans le projet Racin'Air montre que les interactions entre les composantes du système sont apparues importantes à prendre en considération à l'échelle étudiée et complexifie le fonctionnement du système.

Mais, à la lumière des expériences réalisées, il apparaît que ce système peut fonctionner dans différentes conditions météorologiques, en utilisant un procédé adapté de support des boutures, en modulant le fonctionnement de la brumisation, le type de capot de confinement utilisé (type de matériau, forme, degré d'étanchéité) et la gestion climatique de l'abri. Les règles de décision suivantes peuvent être retenus :

- En période hivernale :
  - Brumisation moyennement fréquente (30 secondes toutes les 3 minutes),
  - Absence possible de capot de confinement sauf en période de chauffage de l'eau brumisée où l'utilisation d'un capot permet de limiter les déperditions de chaleur (mais avec une légère ventilation pour éviter les risques de condensation et de gouttage).
  - Ombrage faible voire nul.
  - Confinement de l'abri pour conserver la chaleur gratuite fournie par le faible ensoleillement. Ecran thermique déployé la nuit si celui-ci existe.
- En période estivale :
  - Brumisation fréquente (1 à 2 minutes et 30 secondes toutes les 3 minutes ou fonctionnement en continu aux heures les plus chaudes de la journée),
  - Confinement complet ou presque complet des parties aériennes par un capot de forme adaptée pour éviter le gouttage.
  - Aération maximum de l'abri pour diminuer les températures.
  - Ombrage fort et de préférence, proportionnel à l'ensoleillement.

L'apprentissage progressif et le temps nécessaire à l'optimisation du fonctionnement du dispositif d'aéroponie ont cependant perturbé l'enracinement de différents lots de boutures évalués au cours du projet qui n'ont pas de ce fait, été observés en condition optimale.

### 1.3.3 Fonctionnement du module de traitement de l'eau et des équipements de régulation.

A l'exception d'un épisode, le module de traitement de l'eau brumisé a bien fonctionné depuis la mise en route du dispositif en novembre 2023. Son fonctionnement n'a pas été interrompu depuis. Sa conception ne pose pas de question majeure.

Cet épisode était lié au fonctionnement en mode « alarme » qui s'est déclenché une fois à cause d'une mesure de pH trop éloignée de la consigne. Ce déclenchement a entraîné une mise à l'arrêt de la brumisation. Depuis,

le mode alarme a été réglé pour avoir une poursuite du processus de brumisation en cas d'alarme. L'arrêt de la brumisation étant jugé plus dommageable que sa poursuite avec un écart de pH.

Mais, en ce qui concerne l'utilisation du dispositif, il y a toutefois quelques points de vigilance à retenir et qui doivent faire l'objet d'un suivi particulier ou qui posent question :

- **La régulation du pH de l'eau brumisé.** Le fonctionnement de la régulation du pH est très lié à la qualité de l'eau de départ et notamment, à son pouvoir tampon. Les eaux chargées, avec un pouvoir tampon élevé, nécessitent d'injecter des quantités importantes d'acide. Or, en circuit fermé, pour un volume d'eau moyen comme c'est le cas pour ce prototype, on observe consécutivement à cela, une augmentation de la salinité de l'eau stockée (mesurée par la conductivité électrique). Le comportement est très différent d'une culture hors-sol en circuit ouvert. Dans notre cas, lors du démarrage d'un cycle de multiplication, avec une eau non encore régulée, on a observé des injections trop importantes d'acide en début de régulation, avec des descentes de pH beaucoup trop prononcées. Aussi, nous avons pris le parti :
  - o De travailler avec des solutions mères d'acide nitrique très diluées.
  - o Lors du démarrage d'un cycle de multiplication avec un nouveau stocke d'eau, de faire une première acidification en versant une quantité bien définie l'acide nitrique diluée dans la réserve d'eau pour arriver à un niveau de pH proche de la consigne avant de mettre la régulation automatique du pH en route.
  - o D'utiliser de l'eau faiblement chargé en éléments minéraux et à faible pouvoir tampon pour ne pas que des quantités fortes d'acide soit injectées et modifie l'EC de l'eau.
  - o De mesurer au préalable le pouvoir tampon de l'eau utilisée pour préciser les quantités d'acide à injecter pour atteindre le niveau de pH souhaité.
  - o La consigne de pH a été fixée à 5,6 pour le bouturage d'espèce neutrophile.
- **Le nettoyage des filtres** doit être réaliser régulièrement pour éviter les pertes de pression au niveau des buses de brumisation et conserver la qualité de la brumisation. Même si on travaille avec une eau très propre au départ et dans un circuit restant à l'obscurité, on observe tout de même que l'eau se charge de matière organique.
- **La désinfection de l'eau :** Comme déjà précisé précédemment, pour certaines espèces d'arbustes (Griselinia par exemple), il a été observé des développements bactériens relativement important à la base des boutures qui prenaient la forme de gel. Ce développement à participer au colmatage des filtres pour certaines séries réalisées avec des conséquences fortes sur la qualité de la brumisation et a entraîné des pertes de boutures. De plus, les boutures présentant un gel bactérien abondant à leur base ne se sont pas enracinées. La présence d'eau stagnante dans la cuve favorise la prolifération d'algues dans le circuit. Une désinfection de l'eau est jugée nécessaire. Elle est faite dorénavant de façon systématique et en préventif pour éviter ces problèmes. Il aurait été préférable de prévoir l'installation d'un procédé d'injection de désinfectant lors de la conception du module. Du peroxyde d'hydrogène a donc été ajouté dans l'eau à PLFP et au CATE (à la concentration de 10 ppm d'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dans la réserve d'eau pour la brumisation au rythme d'1 ou 2 fois /semaine). Cela n'a pas eu d'incidence sur l'enracinement des boutures.
- **Le chauffage de l'eau :** la consigne de chauffage de l'eau brumisée a été fixée à 22°C au départ de l'évaluation pour être ramenée ensuite à 20°C. C'est l'eau stockée qui est chauffée par un thermoplongeur électrique. L'eau de la réserve est brassée par l'injection d'air servant à son aération. Ce dispositif est régulé par une sonde de température et l'automate à 0,1°C près. Ce dispositif a parfaitement fonctionné.

Cependant, on observe au cours des journées chaudes, une élévation de la température de l'eau stockée qui peut être sensible. Ainsi, au cours de l'été 2025 qui a été caniculaire, on a pu observer des températures d'eau atteignant 27 à 28°C dans la journée. Il est difficile d'apprécier l'effet d'un tel niveau de température sur l'enracinement des boutures. Les boutures en place à ces périodes et qui étaient déjà enracinées n'ont pas subi de dommage. Dans ce contexte, il est important d'oxygéner l'eau car sa concentration en oxygène dissous diminue avec l'augmentation des températures

- **Oxygénation de l'eau :** pour le prototype du CATE, l'oxygénation de l'eau a été réalisée par injection d'air par une pompe à air et bullage dans le réservoir de stockage d'eau. Le fonctionnement de

l'injection a été fait par intermittence (2 minutes de fonctionnement toutes les 4 minutes) depuis le début du projet sans mesure en continu de la concentration en O<sub>2</sub> dissous. Du fait des températures d'eau observée au cours de l'été 2025, ce paramètre sera mesuré à partir de septembre 2025 de façon à vérifier la saturation ou non de l'eau en O<sub>2</sub> afin de mieux piloter l'injection d'air, pour l'augmenter en été et la diminuer en hiver si nécessaire.

- **Injection d'engrais et la fertilisation** : au cours de ce projet, aucun engrais n'a été apporté dans l'eau servant à la brumisation. L'eau utilisée était de l'eau claire non fertilisée. Les essais réalisés au cours du projet précédent X-Aéroपो montraient qu'une EC basse était plus favorable à la rhizogenèse.

### 1.3.4. Consommation d'intrants par le dispositif d'aéroponie du CATE

La consommation d'électricité par le prototype de bouturage par aéroponie installé au CATE est précisée dans le tableau n°4. La figure n°20 illustre la répartition mensuelle de cette consommation ramenée au m<sup>2</sup> de table de bouturage, la consommation d'électricité du dispositif n'est pas négligeable. Elle s'élève en 2024, pour une année complète de mesure à 429 KWh /m<sup>2</sup> de table de bouturage /an. Elle est à attribuer principalement au chauffage de l'eau, au fonctionnement de la pompe pour la brumisation, au fonctionnement de la pompe à air pour l'oxygénation et aux différents procédés de régulation. Toutefois, cette valeur est à relativiser car des économies d'échelle importantes sont à attendre pour ce prototype, En effet, le module de traitement de l'eau tel qu'il est dimensionné peut fonctionner avec une surface de table de bouturage beaucoup plus importante (4-5 fois supérieure). Toutefois, pour l'étude de ce prototype, il n'a pas été jugé utile d'utiliser une table de bouturage supérieure à 5 m<sup>2</sup>. De plus, Le coût d'électricité /bouture enracinée sera fortement affecté par la surface du dispositif, la densité de boutures /m<sup>2</sup> et la durée d'occupation de la table de bouturage par les boutures. Pour une bouture cultivée de façon théorique pendant un an sur la table de bouturage, on arrive dans ces conditions à une consommation électrique de 0,51 KWh /bouture /an, soit un coût de 0,035 € HT /bouture /an. Mais, plusieurs séries de boutures sont réalisées par an à la même place.

Pour mémoire, pour le bouturage en substrat et dans l'exemple du CATE, la consommation d'énergie pour le chauffage de la serre de multiplication affectée à cette production a été de 104 KWh /m<sup>2</sup> /an en 2024, soit un coût de 6,5 €/m<sup>2</sup> /an (serre chauffée à 17°C au gaz avec écran thermique et chauffage localisé sous tablette d'octobre à mai) et de 0,15 KWh / bouture /an ou 0,0098 € HT / bouture Ø3 cm /an.

Si on tient compte des économies d'échelle associés à l'augmentation de la surface de la table de bouturage, on arrive à des coûts d'électricité du même ordre de grandeur que les coûts de chauffage d'une serre où le bouturage est fait en substrat. Ces valeurs seront à préciser.

#### Consommation électrique du prototype de bouturage par aéroponie - CATE

<u>Consommation électrique du prototype en KWh /m<sup>2</sup> de boutures</u>				<u>Consommation électrique du prototype en KWh /boutures (1)</u>				<u>Coût de la consommation électrique en € /boutures (2)</u>			
Mois	2023	2024	2025	Mois	2023	2024	2025	Mois	2023	2024	2025
Janvier		58	63	Janvier		0,067	0,072	Janvier		0,006	0,006
Février		37	51	Février		0,043	0,059	Février		0,004	0,005
Mars		41	50	Mars		0,047	0,057	Mars		0,004	0,005
Avril		30	35	Avril		0,035	0,040	Avril		0,001	0,002
Mai		31	26	Mai		0,036	0,030	Mai		0,002	0,001
Juin		30	24	Juin		0,035	0,027	Juin		0,001	0,001
Juillet		40	23	Juillet		0,047	0,026	Juillet		0,002	0,001
Août		13	42	Août		0,015	0,048	Août		0,001	0,002
Septembre		12		Septembre		0,014		Septembre		0,001	0,000
Octobre		37		Octobre		0,042		Octobre		0,003	0,000
Novembre	44	48		Novembre	0,051	0,055		Novembre	0,004	0,005	0,000
Décembre	52	62		Décembre	0,060	0,071		Décembre	0,005	0,006	0,000
Total	96	439	313	Total	0,111	0,506	0,360	Total	0,009	0,035	0,023

(1) Avec le procédé mousse + cornière PVC procurant une densité de :

868 boutures /m<sup>2</sup> de dispositif d'aéroponie

(2) prix unitaire moyen de l'électricité : 0,0829 € HT /KWh en période hivernale et 0,0429 € HT /KWh en période estivale.

Tableau n°4 : consommation d'électricité par le dispositif d'aéroponie installée au CATE pour les bouturages des végétaux.

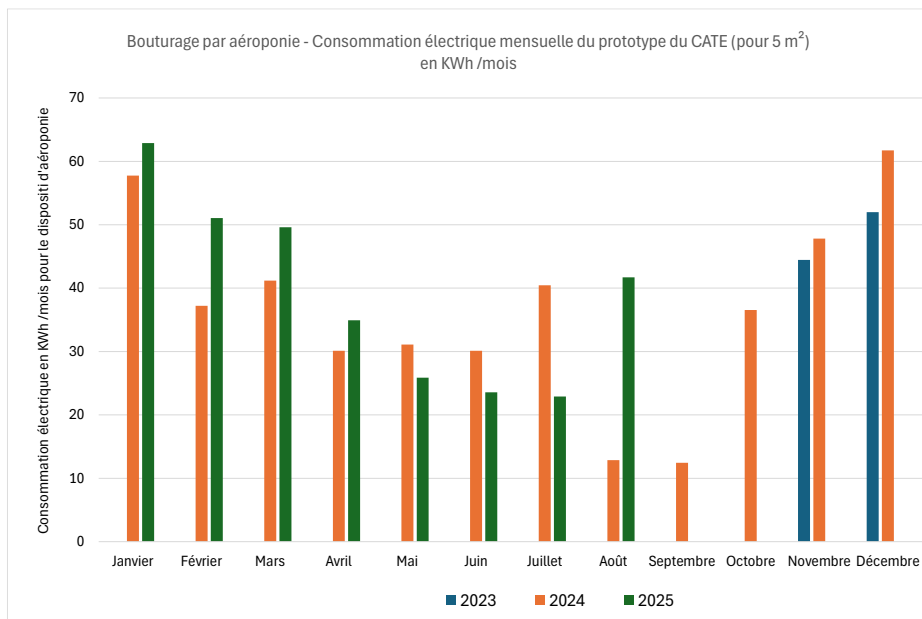


Figure n°20 : Répartition mensuelle de la consommation d'électricité pour le bouturage par aéroponie..

En ce qui concerne la consommation d'eau, du fait de la mise au point de la conduite et des problématiques rencontrées au cours des tests (pH inadapté, accumulation de sel dans l'eau brumisée, développements bactériens), il a été jugé préférable dans un premier temps de vidanger la réserve d'eau avant le lancement de chaque nouvelle série de bouturage, c'est-à-dire à 3 ou 4 reprises /an. 1200 L d'eau ont été nécessaires en 2024 (année complète) pour le fonctionnement du dispositif, soit 240 L /m<sup>2</sup> de table de bouturage. On constate également que la transpiration des boutures a abouti à la consommation de 30 % de l'eau stockée, soit environ 400 L en 2024 pour le dispositif (c'est-à-dire 80 L d'eau /m<sup>2</sup> de table de bouturage).

L'utilisation de l'aéroponie pour la multiplication permet de limiter la consommation de plastique et de substrat. Pour la phase de bouturage, les éléments en plastiques du procédé de maintien des boutures sont réutilisables. Aucune plaque de multiplication en plastique jetable n'est utilisée pendant la phase d'enracinement à la différence du bouturage conventionnel en substrat. Après l'enracinement des boutures en aéroponie, les boutures enracinées sont empotées dans du substrat et dans des godets biodégradables. Ces godets biodégradables sont portés par une plaque en plastique réutilisable. Ce type de godet et de plaque pourrait également être utilisé en production conventionnelle.

L'Indice de Fréquence de Traitement (IFT) est utilisé dans ce projet pour évaluer l'utilisation de produits phytosanitaires durant la phase de multiplication. Au cours de ce projet, il n'a pas été utilisé de produit phytosanitaire d'origine synthétique pour les traitements des boutures produites. Aucun fongicide n'a été utilisé bien que cela aurait été nécessaire du fait de développement de maladies foliaires sur certaines boutures. Mais, ce problème a été attribué à la conception des procédés de maintien des boutures testés qui laissaient passer l'humidité du compartiment racinaire vers le compartiment des parties aériennes. En conséquence, des boutures ont été perdues. Le dernier procédé testé laisse penser que cette difficulté ne devrait pas se reproduire. Quelques applications de produits de biocontrôle ont toutefois été réalisées sur certaines séries de boutures pour lutter contre des ravageurs. En effet, du fait de la présence de pucerons, il a été préféré assainir les boutures par ce moyen avant d'installer des auxiliaires. Cette présence de pucerons est à attribuer à l'état sanitaire des pieds mères et non au système de multiplication.

### **1.3.5. Comportement de différents taxons lors du bouturage par aéroponie et réussite du bouturage**

Au cours de la mise au point des dispositifs d'aéroponie, différentes séries de bouturage ont été réalisées avec de nombreuses espèces de plantes ornementales. 93 taxons ont ainsi été observés en mettant en place différentes modalités de façon à vérifier les effets de plusieurs facteurs sur la réussite du bouturage. Ces facteurs ont notamment été la période de bouturage, le type de boutures (de tête ou de tronçon), le degré de lignification des boutures (herbacées, semi-herbacées, semi-ligneuses, ligneuses) et l'utilisation d'auxine. Le type de bouturage (en aéroponie ou sur substrat) a également été comparé pour un certain nombre de ces taxons. Au total, 935 lots différents de boutures ont été observés, pour un nombre total de plus de 23 800 boutures réalisées

par les stations CATE, CDHRC et PLFP entre 2023 et 2025. Les espèces testées sont listées dans les tableaux n°5-1 et 5-2.

**Comportement des taxons vis-à-vis du bouturage par aéroponie - % de boutures enracinées**

% de boutures enracinées	Très faible (<20%)	Groupe D
	Faible (20% à 40%)	Groupe C
	Moyen (40% à 70%)	Groupe B
	Elevé (>70%)	Groupe A

Taxons	% de réussite du bouturage obtenu avec la conduite initiale	% de réussite du bouturage obtenu après modification de la conduite de bouturage	Sans amélioration du % de boutures enracinées malgré la modification de la conduite de bouturage
1 <i>Abelia grandiflora</i>	A		
2 <i>Acacia dealbata</i> Gaulois	D		D
3 <i>Amelanchier</i>	D		
4 <i>Arbutus Unedo</i>	D		
5 <i>Aronia melanocarpa</i>	D	B	
6 <i>Artemisia absinthium</i>	C		
7 <i>Azalea japonica</i> 'Purple splendor'	D		
8 <i>Begonia</i>	C	A	
9 <i>Buddleia davidii</i>	B	A	
10 <i>Bulbine frutescens</i>	A		
11 <i>Calibrachoa</i>	A		
12 <i>Camelia japonica</i> 'Dainty California'	D	A	
13 <i>Camelia japonica</i> 'Tom Knudsen'	D	C	
14 <i>Camelia sinensis</i>	D	A	
15 <i>Caryopteris clandonensis</i>	A		
16 <i>Cassia corymbosa</i>	D	A	
17 <i>Ceanothe thyrsiflorus repens</i>	D	A	
18 <i>Choisya ternata</i>	C	A	
19 <i>Cistus corbariensis</i>	D	B	
20 <i>Citrus australasica</i>	D		
21 <i>Clematis</i>	D	B	
22 <i>Coleus blumei</i>	A		
23 <i>Cornus</i>	D		
24 <i>Cotinus coggygria</i>	D		D
25 <i>Cupressocyparis leylandii</i>	D	C	
26 <i>Deutzia gracilis</i>	A		
27 <i>Diervilla</i>	C		
28 <i>Dipladenia Mandevilla</i>	A		
29 <i>Distylium</i>	B	A	
30 <i>Eriostemon myoporoides</i>	D	C	
31 <i>Escallonia laevis</i>	D	C	
32 <i>Eucalyptus 'Gunnii'</i>	D		D
33 <i>Euonymus</i>	B	A	
34 <i>Euphorbia pulcherrima</i>	D	A	
35 <i>Ficus</i>	A		
36 <i>Fuchsia hybrida</i>	A		
37 <i>Gaillardia</i>	D		
38 <i>Gaura lindheimeri</i>	B	A	
39 <i>Geranium cantabrigense</i>	A		
40 <i>Geranium macrorrhizum</i>	A		
41 <i>Griselinia littoralis</i>	D	C	
42 <i>Hibiscus syriacus</i>	A		
43 <i>Hydrangea paniculata</i>	A		
44 <i>Hydrangea macrophylla</i>	A		
45 <i>Hypericum inodorum</i>	A		
46 <i>Hyssopus officinalis</i>	A		

Tableau n°5-1 : Liste des taxons bouturés en aéroponie et comportement de bouturage.

Ces tableaux indiquent le comportement d'enracinement lors du bouturage en aéroponie de chaque espèce testée. Elles ont été classées dans un premier temps en 4 classes en fonction du % de réussite obtenu lors du premier test de bouturage réalisé. Seulement 34% des espèces ont bien répondu au bouturage par aéroponie avec un taux de boutures enracinées supérieure à 70% (groupe A). Pour les autres taxons, le % insuffisant d'enracinement des boutures peut être attribué soit à des problèmes dans le fonctionnement des dispositifs de bouturage par aéroponie en cours de mise au point, soit à la conduite du bouturage adoptée pour ces tests (période, type et stade de bouturage inadaptés, soit à la qualité intrinsèque des boutures.

Dans un second temps, le comportement d'enracinement d'une partie de ces taxons après les tests de différentes modalités visant à améliorer la réussite du bouturage a également été renseigné.

**Comportement des taxons vis-à-vis du bouturage par aéroponie - % de boutures enracinées (2ème partie)**

% de boutures enracinées	Très faible (<20%)	Groupe D
	Faible (20% à 40%)	Groupe C
	Moyen (40% à 70%)	Groupe B
	Elevé (>70%)	Groupe A

Taxons	% de réussite du bouturage obtenu avec la conduite initiale	% de réussite du bouturage obtenu après modification de la conduite de bouturage	Sans amélioration du % de boutures enracinées malgré la modification de la conduite de bouturage
47 <i>Impatiens interspecific</i>	A		
48 <i>Kiwai</i>	C		
49 <i>Lagerstroemia</i>	D		
50 <i>Lantana camara</i>	A		
51 <i>Lavandula</i>	D	A	
52 <i>Leycesteria formosa</i>	A		
53 <i>Ligustrum</i>	C		C
54 <i>Lobularia maritima</i>	C	A	
55 <i>Lonicera</i>	C	A	
56 <i>Loropetalum chinense</i>	D		
57 <i>Magnolia</i>	C		C
58 <i>Malus coccinella</i>	D		
59 <i>Myrtus communis</i>	D	A	
60 <i>Nemesia fructians</i>	A		
61 <i>Nepeta x faassenii 'Cat's meow'</i>	C		
62 <i>Ocimum basilicum</i>	A		
63 <i>Osmanthus x burkwoody</i>	D		D
64 <i>Osteospermum</i>	A		
65 <i>Passiflora edulis</i>	D	A	
66 <i>Pelargonium</i>	B	A	
67 <i>Perovskia</i>	D	A	
68 <i>Physocarpus opulifolius</i>	C	A	
69 <i>Pieris japonica</i>	C		
70 <i>Pittosporum tenuifolium</i>	D	C	
71 <i>Potentilla fruticosa</i>	B	A	
72 <i>Prunus cerasus</i>	D		
73 <i>Punica granatum</i>	D	A	
74 <i>Rhododendron ponticum variegata</i>	D		D
75 <i>Ribes nigrum</i>	D	A	
76 <i>Ribes sanguineum</i>	A		
77 <i>Rosa</i>	D		
78 <i>Rosmarinus officinale</i>	B	A	
79 <i>Rubus idaeus</i>	D	A	
80 <i>Ruta graveolens</i>	A		
81 <i>Salix integra</i>	A		
82 <i>Salvia</i>	B	A	
83 <i>Sambucus nigra</i>	A		
84 <i>Sedum</i>	A		
85 <i>Sorbaria sorbifolia</i>	B	A	
86 <i>Spirea japonica</i>	A		
87 <i>Streptocarpus saxorum</i>	A		
88 <i>Symphoricarpos</i>	A		
89 <i>Syringa vulgaris</i>	C	A	
90 <i>Vaccinium corymbosum</i>	D		D
91 <i>Viburnum opulus</i>	D		D
92 <i>Viburnum tinus</i>	A		
93 <i>Vitex agnus castus</i>	A		

Tableau n°5-2 : Liste des taxons bouturés en aéroponie et comportement de bouturage (suite).

Ces essais portant sur les dates de bouturage, le type et le stade des boutures ou sur l'utilisation d'auxine ont permis d'accroître fortement le % des taxons présentant un % de boutures enracinées supérieur à 70%. Ainsi, comme l'indique le tableau n°6, à l'issue de ces essais, 62 % des taxons ont pu être classés dans le groupe A (avec un taux de boutures enracinées supérieur à 70%).

% de boutures enracinées		Répartition des taxons en fonction du taux de réussite du bouturage		
		Obtenu avec la conduite de bouturage initiale mise en œuvre lors du 1er essai	Obtenus après amélioration de la conduite du bouturage	
	Elevé (>70%)	Groupe A	34%	62,4%
	Moyen (40% à 70%)	Groupe B	10%	4,3%
	Faible (20% à 40%)	Groupe C	14%	15,1%
	Très faible (<20%)	Groupe D	42%	18,2%

Tableau n°6 : Répartition des taxons en fonction de leur taux de réussite du bouturage.

Le tableau n°6 montre qu'à l'issue de ces essais de bouturage, 33 % des taxons testés s'enracinent encore difficilement ou restent récalcitrant au bouturage malgré la mise en œuvre du bouturage par aéroponie. Bien que parmi ces espèces, toutes n'ont pas fait l'objet d'essais pour améliorer cette situation, ce résultat laisse penser qu'une des hypothèses de départ de ce projet qui consistait à améliorer l'oxygénation à la base des boutures n'est pas toujours une condition suffisante pour améliorer leur enracinement. D'autres facteurs interviennent. Parmi ceux-là, la qualité intrinsèque des boutures liée à la physiologie des pieds mères reste un facteur à étudier.

### Conduite du bouturage en aéroponie réalisée dans les essais pour les différents taxons - Partie 1

% de boutures enracinées	Très faible (<20%)	Groupe D
	Faible (20% à 40%)	Groupe C
	Moyen (40% à 70%)	Groupe B
	Elevé (>70%)	Groupe A

Taxons	% de réussite du bouturage obtenu avec la conduite initiale	Conduite de bouturage par aéroponie ayant procuré les résultats les plus intéressants dans les essais (1) (2)	Observations
<i>Abelia grandiflora</i>	A	Bouturage semi-herbacé d'été avec une concentration d'AIB de 250 ppm ou de septembre avec une concentration d'AIB de 2000 ppm	Effet de concentration croissante d'AIB faible sur le % de bouture enracinée mais élevé sur la qualité de l'enracinement.
<i>Bulbine frutescens</i>	A	Boutures de têtes herbacées en septembre	
<i>Calibrachoa</i>	A	Boutures de têtes en juin	
<i>Caryopteris clandonensis</i>	A	Boutures de têtes herbacées au printemps. Si boutures de tronçon, utilisation de 100 à 500 ppm d'AIB selon le degré de lignification des boutures.	Net avantage des boutures de tête herbacées ou semi-herbacées sur les boutures de tronçon d'autant plus que ces dernières sont plus ligneuses. Avantage de l'AIB uniquement sur les boutures ligneuses. Eviter les excès d'hygrométrie et d'humidité au niveau des parties aériennes des boutures herbacées comme le manque d'hygrométrie (par l'utilisation d'un confinement partiel adapté).
<i>Coleus blumei</i>	A	Boutures de têtes herbacées d'été ou de fin d'été	
<i>Deutzia gracilis</i>	A	Boutures de têtes herbacées de fin d'été	
<i>Dipladenia Mandevilla</i>	A	Boutures de têtes semi-herbacées d'été ou de fin d'été	
<i>Ficus</i>	A	Boutures semi-herbacées à semi-ligneuses de fin d'été ou de début d'automne	
<i>Fuchsia hybrida</i>	A	Boutures de têtes de début d'automne	
<i>Geranium cantabrigense</i>	A	Boutures de têtes semi-herbacées de début d'automne	
<i>Geranium macrorrhizum</i>	A	Boutures de têtes herbacées à semi-herbacées de début d'automne	
<i>Hibiscus syriacus</i>	A	Boutures de têtes herbacées à semi-herbacées ou de tronçon semi-ligneuses de début d'été	
<i>Hydrangea paniculata</i>	A	Boutures de têtes herbacées ou semi-herbacées ou semi-ligneuses de printemps ou d'été	
<i>Hydrangea macrophylla</i>	A	Boutures de têtes herbacées ou semi-herbacées ou semi-ligneuses de printemps ou d'été	
<i>Hypericum inodorum</i>	A	Boutures de têtes ligneuses de fin d'été	
<i>Hysopus officinalis</i>	A	Boutures semi-herbacées à semi-ligneuses d'été ou de début d'automne	
<i>Impatiens interspecific</i>	A	Boutures de têtes herbacées de fin d'été	
<i>Lantana camara</i>	A	Boutures de têtes herbacées de fin d'été	
<i>Leycesteria formosa</i>	A	Boutures de têtes herbacées d'été	
<i>Nemesia fructians</i>	A	Boutures de têtes de juin ou juillet	
<i>Ocimum basilicum</i>	A	Boutures de têtes ou de tronçon d'avril à octobre	
<i>Osteospermum</i>	A	Boutures herbacées d'été	
<i>Ribes sanguineum</i>	A	Boutures de tronçons semi-herbacés à semi-ligneux de début de printemps, sans auxine.	Effet de concentration d'AIB croissante aléatoire selon le matériel végétal à bouturer. Eviter les excès d'hygrométrie et d'humidité au niveau des parties aériennes des boutures peu ligneuses lors du bouturage de printemps
<i>Ruta graveolens</i>	A	Boutures semi-herbacées d'été	
<i>Salix integra</i>	A	Boutures herbacées à ligneuses de d'avril à septembre	
<i>Sambucus nigra</i>	A	Boutures de têtes semi-ligneuses de fin de printemps	
<i>Sedum</i>	A	Boutures herbacées de début d'automne	
<i>Spirea japonica</i>	A	Boutures de têtes de début de printemps	
<i>Streptocarpus saxorum</i>	A	Boutures herbacées d'été	
<i>Symphoricarpus</i>	A	Boutures de têtes semi-ligneuses d'été	
<i>Viburnum tinus</i>	A	Boutures de têtes semi-ligneuses à ligneuses de fin d'été	
<i>Vitex agnus castus</i>	A	Boutures de têtes semi-ligneuses d'été	

(1) Les références produites dans ces tableaux sont issues des résultats des essais réalisés au cours du projet. Elles sont associées au procédé de bouturage par aéroponie telle qu'il a été mise en oeuvre par les partenaires. Mais, elles ne constituent pas des références exhaustives et d'autres conduites et possibilités de multiplication existent.

(2) Les concentrations d'auxines référencées dans ces tableaux correspondent à une utilisation en trempage de la base des boutures (sur 1 à 2 cm) dans une solution aqueuse d'AIB soluble dans l'eau pendant 4 heures avant le repiquage sur la table de bouturage. D'un point de vue générale, la concentration optimale d'auxine à utiliser dépend de l'espèce, de la variété et du degré de lignification de la bouture. Plus une bouture est herbacée, plus faible sera la concentration d'auxine à utiliser et inversement, les boutures plus ligneuses pourront supporter des concentrations d'auxine plus élevées avec moins de risque de phytotoxicité. Une concentration trop forte d'AIB sur des boutures trop herbacées risque de provoquer une phytotoxicité. Des tests préliminaires dans ses conditions d'utilisation sont nécessaires.

Concentration en AIB exprimée en ppm (= mg d'AIB /L d'eau)

Tableau n°7-1 : Conditions de bouturage ayant permis d'atteindre un % de boutures enracinées par aéroponie supérieure à 70 % au cours des essais réalisés dans le projet Racin'Air par les stations CATE, CDHRC et PLFP.

Pour les taxons de la catégorie A, c'est-à-dire, dont le taux de boutures enracinées atteint au minimum 70 %, les conditions de bouturage qui ont permis d'atteindre ces résultats sont précisées dans les tableaux n°7-1 et 7-2. Ainsi, pour ces taxons, les facteurs expérimentés au cours des essais et qui ont été déterminant pour la réussite du bouturage parmi la période de bouturage, le type de boutures, leur stade et l'utilisation d'auxine, sont renseignés.

### Conduite du bouturage en aéroponie réalisée dans les essais pour les différents taxons - Partie 2

% de boutures enracinées	Très faible (<20%)	Groupe D
	Faible (20% à 40%)	Groupe C
	Moyen (40% à 70%)	Groupe B
	Elevé (>70%)	Groupe A

Taxons	% de réussite du bouturage obtenu avec la conduite initiale	% de réussite du bouturage obtenu après amélioration de la conduite de bouturage	Conduite de bouturage par aéroponie ayant procuré les résultats les plus intéressants dans les essais après adaptation des conduites (1) (2)	Observations
<i>Begonia</i>	C	A	Boutures de têtes herbacées en juin	Diminution du % de boutures enracinées pour les bouturages d'été, de fin d'été et d'automne.
<i>Buddleia davidii</i>	B	A	Boutures herbacées de printemps et de fin d'été ou boutures semi-ligneuses de fin d'été et d'automne	Fort accélération de l'enracinement au printemps (< 60 jours) et fort ralentissement pour les bouturages d'automne (> 100 jours)
<i>Camelia japonica 'Dainty California'</i>	D	A	Boutures de têtes semi-herbacées à semi-ligneuses en milieu de printemps avec AIB à 100 ppm.	Effet favorable du wounding. Enracinement des boutures très différent d'une variété à l'autre.
<i>Camelia sinensis</i>	D	A	Boutures de têtes semi-herbacées à semi-ligneuses au printemps ou en automne avec AIB.	Effet favorable du wounding. Enracinement des boutures différent d'une variété à l'autre. Fort effet de la température pour le bouturage d'automne avec un intérêt important du chauffage de la solution de brumisation. La concentration d'AIB à utiliser dépend beaucoup du degré de lignification des boutures.
<i>Cassia corymbosa</i>	D	A	Boutures de têtes semi-herbacées au printemps avec AIB	La concentration d'AIB à utiliser dépend du degré de lignification des boutures.
<i>Ceanothe thyriflorus repens</i>	D	A	Boutures de têtes semi-herbacées à semi-ligneuses au printemps avec AIB à 100 ppm	L'AIB améliore fortement le % de boutures enracinement et sa qualité mais une concentration trop forte est pénalisante.
<i>Choisya ternata</i>	C	A	Boutures de têtes semi-herbacées au printemps et en été (ou en automne avec chauffage) avec AIB à 200 ppm	
<i>Distylium</i>	B	A	Boutures de têtes semi-ligneuses avec AIB à 200 ppm en juillet	
<i>Evonymus</i>	B	A	Boutures herbacées à ligneuses du printemps à l'automne	
<i>Euphorbia pulcherrima</i>	D	A	Boutures de têtes semi-herbacées en été avec cauterisation par trempage de la base des boutures dans l'eau chaude pour éviter le bouchage des vaisseau par le latex	Effet très intéressant du trempage à l'eau chaude de la base des boutures pour éviter les problèmes liés au latex (amélioration du % de la réussite du bouturage de 70%)
<i>Gaura lindheimeri</i>	B	A	Boutures de têtes herbacées au printemps	
<i>Lavandula</i>	D	A	Boutures herbacées au début du printemps ou semi ligneuses en début d'été.	Les bouturages après fin août
<i>Lobularia maritima</i>	C	A	Boutures de têtes en fin d'été	
<i>Lonicera caerulea Kamtchatika</i>	C	A	Bouture de têtes herbacées en avril avec AIB à 200 ppm (trempage base des boutures pendant 4 h) ou de têtes semi-ligneuses en septembre avec AIB à 200 ppm (trempage base des boutures pendant 6 h).	Empotage en godet possible en 30 à 40 jours avec un taux de réussite du bouturage de 75 à 93 %
<i>Myrtus communis</i>	D	A	Bouture de têtes semi-herbacées avec AIB à 250 ppm (trempage base des boutures pendant 2 à 4 h) ou de tronçons semi-herbacés avec AIB à 500 ppm (trempage base des boutures pendant 2 à 4 h) au printemps ou en été.	Effet intéressant de l'auxine sur le % de boutures enracinées mais aussi sur la qualité de l'enracinement. Un trempage de la base des boutures dans la solution d'AIB rapide (quick deep), d'1 heure ou prolongé (6h et plus) donne des résultats moins intéressants.
<i>Passiflora edulis</i>	D	A	Boutures de tronçon semi-ligneuses en hiver avec AIB à 200 ppm.	Seule la période d'hiver a été testée dans ces essais. Des boutures de têtes ou de tronçons semi-herbacés ne sont pas aussi intéressantes que des boutures semi-ligneuses. De même, des boutures trop ligneuses conviennent moins bien et nécessite une concentration d'auxine supérieure (500 ppm). Avec de l'AIB à 200 ppm pour les boutures semi-ligneuses ou à 500 ppm pour des boutures plus ligneuses, on observe également un effet intéressant sur la qualité de l'enracinement.
<i>Pelargonium</i>	B	A	Boutures de têtes herbacées ou semi-herbacées en début de printemps ou en fin d'été - début d'automne.	Réussite un peu plus aléatoire en milieu d'été.
<i>Perovskia</i>	D	A	Boutures de tronçon semi-herbacées à semi-ligneuses au printemps avec AIB de 100 à 500 ppm selon le degré de lignification des boutures	
<i>Physocarpus opulifolius</i>	C	A	Boutures de têtes herbacées au début du printemps (sans AIB) ou de tronçon semi-herbacées à semi-ligneuses en début d'été (avec AIB à 200 ppm).	L'auxine améliore également la qualité de l'enracinement sur les boutures semi-herbacées à semi-ligneuses mais n'est pas nécessaire sur les boutures de têtes herbacées.
<i>Potentilla fruticosa</i>	B	A	Boutures herbacées de début de printemps ou boutures semi-herbacées de fin	
<i>Punica granatum</i>	D	A	Boutures de tronçon semi-ligneuses en fin d'été avec AIB à 200 ppm.	Effet non négligeable de la gestion de l'hygrométrie au niveau des parties aériennes pour cette espèce. Un confinement des parties aériennes par un châssis est favorable en période ensoleillée. Effet intéressant de l'auxine sur la qualité de l'enracinement.
<i>Ribes nigrum</i>	D	A	Boutures de têtes semi-ligneuses ou de tronçon ligneuses en été sans AIB.	Des concentrations croissantes d'AIB n'ont pas amélioré la réussite du bouturage déjà très intéressante sans AIB. Cet effet est même négatif pour les boutures semi-herbacées à semi-ligneuses.
<i>Rosmarinus officinale</i>	B	A	Boutures de têtes d'été ou de fin d'été sans AIB	Des boutures semi-ligneuses offrent une réussite moins intéressantes que des boutures herbacées. Un essai montre que le prélèvement des boutures sur des pieds mères en restriction hydrique (non flétris) entraîne une réduction du % de boutures enracinées de 20 à 25% par rapport à un prélèvement sur des pieds mères en confort hydrique.
<i>Rubus idaeus</i>	D	A	Boutures ligneuses de fin d'automne	
<i>Salvia</i>	B	A	Boutures de têtes herbacées ou semi-herbacées d'été ou de fin d'été sans AIB.	Auxine nécessaire pour boutures de tronçon ligneuse en automne ou hiver.
<i>Sorbaria sorbifolia</i>	B	A	Boutures de têtes semi-ligneuses en mai	
<i>Syringa vulgaris</i>	C	A	Boutures de têtes semi-herbacées avec AIB à 500 ppm ou herbacées, au printemps.	L'utilisation d'auxine améliore fortement la qualité de l'enracinement. Le confinement des parties aériennes ne doit pas être excessif pour ne pas sensibiliser les boutures aux maladies du feuillage.

(1) Les références produites dans ces tableaux sont issues des résultats des essais réalisés au cours du projet. Elles sont associées au procédé de bouturage par aéroponie telle qu'il a été mise en oeuvre par les partenaires. Mais, elles ne constituent pas des références exhaustives et d'autres conduites et possibilités de multiplication existent.

(2) Les concentrations d'auxines référencées dans ces tableaux correspondent à une utilisation en trempage de la base des boutures (sur 1 à 2 cm) dans une solution aqueuse d'AIB soluble dans l'eau pendant 4 heures avant le repiquage sur la table de bouturage. D'un point de vue générale, la concentration optimale d'auxine à utiliser dépend de l'espèce, de la variété et du degré de lignification de la boutures. Plus une bouture est herbacée, plus faible sera la concentration d'auxine à utiliser et inversement, les boutures plus ligneuses pourront supporter des concentrations d'auxine plus élevées avec moins de risque de phytotoxicité. Une concentration trop forte d'AIB sur des boutures trop herbacées risque de provoquer une phytotoxicité. Des tests préliminaires dans ses conditions d'utilisation sont nécessaires. Concentration en AIB exprimée en ppm (= mg d'AIB / L d'eau)

Tableau n°7-2 : Conditions de bouturage ayant permis d'atteindre un % de boutures enracinées par aéroponie supérieure à 70 % au cours des essais réalisés dans le projet Racin'Air par les stations CATE, CDHRC et PLFP.

Le fait de travailler sur la période de bouturage, le type de bouture, leur degré de lignification au moment du prélèvement et sur l'utilisation d'auxine constitue un levier important pour améliorer la réussite du bouturage d'un grand nombre de taxons, y compris pour un certain nombre de taxons dont les premiers tests de bouturage se sont révélés très décevants.

Cependant, pour certains taxons, et notamment ceux listés dans le tableau n°7-3, les essais réalisés au cours du projet n'ont pas été suffisants pour améliorer suffisamment le résultat du bouturage afin qu'ils puissent être classés en catégorie A. Des essais complémentaires seraient encore nécessaires pour améliorer cette situation.

**Conduite du bouturage en aéroponie réalisée dans les essais pour les différents taxons Partie 3**

% de boutures enracinées	Très faible (<20%)	Groupe D
	Faible (20% à 40%)	Groupe C
	Moyen (40% à 70%)	Groupe B
	Elevé (>70%)	Groupe A

Taxons	% de réussite du bouturage obtenu avec la conduite initiale	% de réussite du bouturage obtenu après adaptation de la conduite de bouturage	Conduite de bouturage par aéroponie ayant permis d'améliorer les résultats du bouturage sans toutefois atteindre une réussite suffisante. Des essais complémentaires seront nécessaires pour optimiser ces résultats. (1) (2)	Remarques
<i>Aronia melanocarpa</i>	D	B	Boutures semi-herbacées en août.	Utilisation d'AIB à tester
<i>Cistus corbariensis</i>	D	B	Boutures de têtes semi-herbacées avec AIB	Période et concentration d'AIB à préciser
<i>Clematis</i>	D	B	Boutures herbacées avec AIB en début d'été	Période et concentration d'AIB à préciser
<i>Cupressocyparis leylandii</i>	D	C	Boutures de tronçon avec forte concentration d'AIB (2 000 ppm)	Période et concentration d'AIB à préciser
<i>Eriostemon myoporoides</i>	D	C	Boutures de tronçon avec forte concentration d'AIB (1 000 ppm)	Période, stade des boutures et concentration d'AIB à préciser
<i>Escallonia laevis</i>	D	C	Boutures de têtes ligneuses avec AIB à 200 ppm en été	Période, stade des boutures et concentration d'AIB à préciser
<i>Griselinia littoralis</i>	D	C	Boutures de tronçon	Période, stade des boutures et concentration d'AIB à préciser. Présence sur la bouture d'un bourgeon axillaire décollé de l'axe semble avoir un effet négatif sur l'enracinement des boutures. L'apparition d'un mucilage ou d'un biofilm à la base des boutures semble également bloquer leur alimentation hydrique. La désinfection de l'eau servant à la brumisation par du peroxyde d'hydrogène a permis de limiter ce problème.
<i>Pittosporum tenuifolium 'Elisabeth'</i>	D	C	Boutures de têtes semi-ligneuses à ligneuses avec AIB à 2 000 ppm à l'automne	Période, stade des boutures et concentration d'AIB à préciser

(1) Les références produites dans ces tableaux sont issues des résultats des essais réalisés au cours du projet. Elles sont associées au procédé de bouturage par aéroponie telle qu'il a été mise en oeuvre par les partenaires. Mais, elles ne constituent pas des références exhaustives et d'autres conduites et possibilités de multiplication existent.

(2) Les concentrations d'auxines référencées dans ces tableaux correspondent à une utilisation en trempage de la base des boutures (sur 1 à 2 cm) dans une solution aqueuse d'AIB soluble dans l'eau pendant 4 heures avant le repiquage sur la table de bouturage. D'un point de vue générale, la concentration optimale d'auxine à utiliser dépend de l'espèce, de la variété et du degré de lignification de la bouture. Plus une bouture est herbacée, plus faible sera la concentration d'auxine à utiliser et inversement, les boutures plus ligneuses pourront supporter des concentrations d'auxine plus élevées avec moins de risque de phytotoxicité. Une concentration trop forte d'AIB sur des boutures trop herbacées risque de provoquer une phytotoxicité. Des tests préliminaires dans ses conditions d'utilisation sont nécessaires. Concentration en AIB exprimée en ppm (= mg d'AIB /L d'eau)

Tableau n°7-3 : Conditions de bouturage ayant permis d'atteindre un % de boutures enracinées par aéroponie inférieur à 70 % au cours des essais réalisés dans le projet Racin'Air par les stations CATE, CDHRC et PLFP.

Par ailleurs, la station du CDHRC a comparé pour 37 taxons l'enracinement des boutures pour le bouturage par aéroponie et par la méthode de référence du bouturage en substrat en motte de culture.

Les résultats de cette comparaison sont présentés dans le tableau n°8. Pour chaque taxon où cette comparaison a été menée, seule la méthode de bouturage était différente. Le matériel végétal bouturé était identique, provenait des mêmes pieds mères et a été réalisé à la même période.

Pour 9 de ces 37 taxons (24%), le bouturage par aéroponie apporte un avantage significatif en termes de réussite du bouturage et de vitesse d'enracinement alors que pour 22 des 37 taxons étudiés (soit 59%), les résultats du bouturage par aéroponie ne sont pas très différents du bouturage en substrat. Les résultats du bouturage sont en revanche inférieurs en aéroponie pour 6 des taxons étudiés (16%).

**Projet Racin'Air - Comparaison du % de boutures enracinées et de la durée d'enracinement entre le bouturage par aéroponie et le bouturage en substrat pour différents taxons**

Pour chaque taxon, comparaison 2 à 2 entre le bouturage par aéroponie et le bouturage en substrat, toute chose égale par ailleurs (même pieds mères, même matériel végétal, même date de bouturage...)

Taxons	% de boutures enracinées		Durée d'enracinement en jours		Ecart entre aéroponie et substrat	
	Bouturage en aéroponie	Bouturage en substrat	Bouturage en aéroponie	Bouturage en substrat	Pour le % de boutures enracinées	Pour la durée d'enracinement
Abelia	67,3	10,6	71	78	56,8	-7
Amelanchier canadensis	0,0	0,0			0,0	
Aronia melanocarpa 'Viking'	56,7	57,0	83	83	-0,3	0
Azalea japonica 'Purple splendor'	10,0	93,3	172	172	-83,3	0
Buddleja	73,7	37,5	52	52	36,2	0
Calibrachoa	75,0	41,7	55	55	33,3	0
Choisya	41,7	64,2	56	77	-22,5	-21
Citrus australasica	0,0	33,3	116	116	-33,3	0
Clematis	44,0	40,0	100	100	4,0	0
Cotinus	9,7	0,0	61	77	9,7	-16
Eucalyptus	0,0	0,0	116	116	0,0	0
Ficus	80,0	83,3	71	71	-3,3	0
Fusain	83,3	84,4	43	43	-1,1	0
Gaura	41,7	0,0	71	60	41,7	11
Hibiscus	20,0	21,7	79	48	-1,7	31
Hydrangea paniculata	40,0	43,5	78	61	-3,5	17
Hyssopus officinalis	90,0	90,0	60	60	0,0	0
Kiwai	30,0	50,0	60	60	-20,0	0
Lagerstroemia	16,7	0,0	98	71	16,7	27
Lavandin	77,2	53,6	47	52	23,6	-5
Lonicera	23,8	18,4	59	66	5,4	-7
Loropetalum	37,8	2,2	85	226	35,6	-141
Magnolia	33,6	46,7		165	-13,1	
Nemesia	54,6	86,3	31	34	-31,7	-3
Nepeta x faassenii 'Cat's meow'	53,3	100,0	83	83	-46,7	0
Osteospermum	96,7	93,3	83	83	3,3	0
Pelargonium	87,5	86,6	34	40	0,9	-5
Physocarpus	80,0	0,0	71	71	80,0	0
Romarin	82,0	62,7	34	43	19,3	-10
Rutagravéolens	100,0	88,0	71	71	12,0	0
Sauge	100,0	96,7	32	32	3,3	0
Sedum	100,0	100,0	14	14	0,0	0
Troène de californie	93,5	93,5	53	53	0,0	0
Troène du japon	1,7	15,0	224	224	-13,3	0
Troène panaché	0,0	3,4	224	224	-3,4	0
Vaccinium corymbosum	1,5	0,3	106	104	1,2	2
Vitex	73,3	56,7	71	71	16,7	0
Moyenne général	44,4	39,3	94	82	3,3	-3,6

	Taxon pour lequel le bouturage par aéroponie procure des avantages significatifs (amélioration du % de boutures enracinées et/ou de la vitesse d'enracinement) par rapport au bouturage en substrat
	Taxon pour lequel le bouturage en substrat procure des avantages significatifs (amélioration du % de boutures enracinées et/ou de la vitesse d'enracinement) par rapport au bouturage en substrat
	Pas de différence significative pour le taxon considéré

Tableau n°8 : Essai du CDHRC de comparaison entre le bouturage par aéroponie et le bouturage en substrat pour 37 taxons ornementaux.

## **Action 2 : Transfert du procédé, des méthodes et du matériel végétal produit en conditions de production et élargissement à la filière PPAM**

L'action n°2 a été initiée au cours de l'année 2025 en ce qui concerne la diffusion de matériel végétal issu des prototypes d'aéroponie et du procédé lui-même à des producteurs de plantes d'ornement. Mais, le retard pris dans les livraisons et les mises au point des prototypes par les stations a perturbé cette phase du projet. Par contre, pour la filière PPAM, l'été prochain a débuté des expérimentations avec cette technique depuis le début du projet comme prévu initialement.

### **Tâche 2.1 : transfert des boutures produites en condition de production**

Cette tâche n'a pu débuter qu'en 2025. Malgré tout, des quantités significatives de boutures enracinées en aéroponie ont été produites pour différents taxons et diffusées à des pépiniéristes pour évaluer leur intérêt par rapport à la qualité du jeune plant. Ainsi, PLFP a diffusé plusieurs milliers de boutures racinées empotées en godets ou conteneurs de 1 litre à plusieurs de ces adhérents pour les espèces lavandin, potentille, fusain. Les producteurs concernés ont intégré ces jeunes plants dans leur processus de production. Le retour d'expérience a été favorable.

Mais, du fait de la mise au point des prototypes, ce sont surtout des petits lots de jeunes plants qui ont été produits. Or, il était difficile pour les producteurs d'intégrer ces petits lots dans leur processus de production qui

concerne des quantités de plantes beaucoup plus significatives avec des calendriers de culture différents (besoins en eau différents....).

Lors des visites d'essais réalisés chaque année par les stations partenaires, les producteurs ont tout de même pu observer le comportement des jeunes plants produits avec les dispositifs d'aéroponie après leur empotage. La perception de la qualité des plantes produites n'a pas subi de jugement négatif de la part des producteurs.

### **Tâche 2.2 : Installation d'unités pilotes chez des multiplicateurs et des producteurs**

Pour cette tâche également, le retard pris dans la mise au point des prototypes d'aéroponie au cours de l'action n°1 a pénalisé sa mise en œuvre. Ce retard s'est traduit notamment par une mise à disposition trop tardive des données techniques et économiques pour juger de l'intérêt du procédé et éviter des erreurs préjudiciables dans sa mise en œuvre. De ce fait, il n'a pas été possible de déclencher un processus d'investissement dans la technique par un ou des producteurs. De plus, un certain nombre de freins à un développement rapide de la technique ont été observés tels que le montant des investissements.

Cependant, à la fin de l'année 2024, un procédé expérimental de bouturage par aéroponie du type de ceux utilisés au cours du projet X-Aéropo a été prêté à un pépiniériste du Finistère (Pépinières Stervinou -29) pour tester le dispositif sur des espèces de sa gamme. Ces tests ont été poursuivis en 2025.

Par ailleurs, à la date de la fin de ce projet, un procédé est également en cours de construction chez un pépiniériste de l'est de la France et un projet est en cours de réflexion chez un producteur de plantes à massifs du centre de la France. Ce producteur doit en effet commander ses jeunes plants de Pelargonium en juillet pour une livraison de fin d'hiver-début de printemps suivant. Le bouturage par aéroponie lui permettrait d'envisager un complément de production si le marché du printemps est actif, alors qu'il n'est plus possible de commander des jeunes plants, grâce à des prélèvements de boutures sur les 1ères cultures en place avant leur commercialisation. Le bouturage par aéroponie est alors justifiée car il permet d'obtenir des boutures enracinées plus rapidement.

A la lumière de ces expériences, il apparaît que le premier pas pour diffuser la technique pourrait être d'inciter des producteurs intéressés ou curieux à la mettre en œuvre en utilisant des dispositifs expérimentaux tels qu'ils ont été testés dans le projet X-Aéropo avec un très faible coût d'investissement (300 à 500 € pour un dispositif de 1 à 2 m<sup>2</sup>) de façon à s'imprégner de la technique avant d'envisager des investissements plus significatifs pour une dispositif de taille industriel. Les procédés améliorés d'insertion et de récolte des boutures tels qu'ils ont été testés lors de ce projet pourront être utilisés avec les dispositifs expérimentaux.

### **Tâche 2.3 : Elargissement de la technique à la filière PPAM**

De façon à observer l'intérêt et les possibilités de la technique pour la filière PPAM, l'Iteipmai a réalisé 6 essais de bouturage au cours du projet. Cela lui a permis d'acquérir des références sur cette technique de multiplication pour des espèces intéressants la filière des plantes aromatiques, médicinales et à parfum. Les espèces lavande, lavandin et thym ont été choisies parce qu'elles subissent des pertes non négligeables du fait de maladies avec les méthodes traditionnelles de bouturage.

<b>Essai (Période)</b>	<b>Objectifs (Modalités) Variétés / Espèces</b>
Thym 1 (avril 2023) <i>Présenté au dernier COPIL</i>	Prendre en main des modules Comparer 2 méthodes de bouturage (substrat; aéroponie) et 2 types de boutures (tête; tronçon) Sur thym T36 et thym 5-55
Thym 2 (juin 2023) <i>Présenté au dernier COPIL</i>	Comparer différents stades de rempotage après aéroponie (bourgeons racinaires; racine de 2 à 5 mm; racine de 1 à 2 cm; témoin sans aéroponie) Sur thym T36
Température (janvier 2024)	Comparer différentes températures d'eau d'aspersion (19°C; 22°C; 25°C; 28°C; 31°C; témoin sans chauffage) Sur thym T36
Fréquence d'aspersion (mai 2024)	Comparer différentes fréquences d'aspersion (10s toutes les 1min; 30s toutes les 3min; 1min toutes les 10min) Sur thym T36; thym 5-55; lavande Maillette; lavandin Grosso
Température (novembre 2024)	Comparer différentes températures d'eau d'aspersion (19°C; 22°C; 25°C; 28°C; 31°C; témoin sans chauffage) Sur thym T36; thym 5-55; lavande Maillette; lavandin Grosso
Aéro/Terreau (février 2025)	Comparer les 2 méthodes de bouturage (aéroponie avec eau à 22°C et aspersion 10s/min; terreau en plaque) Sur thym T36; thym 5-55; lavande Maillette; lavandin Grosso

Tableau n°9 : Liste des essais réalisés par Iteipmai au cours du projet Racin'Air

Les dispositifs d'aéroponie utilisés ont été des dispositifs relativement simples comparables a ceux utilisés au cours du projet précédent X-Aéropo. Ils ont été disposés dans un tunnel plastique non chauffé. Les boutures enracinées ont été repiquées en godet.



Photo n°1



Photo n°2



Photo n°3

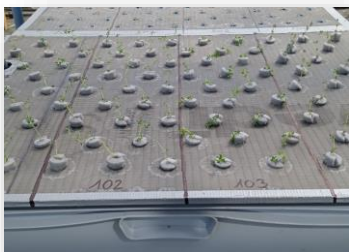


Photo n°4

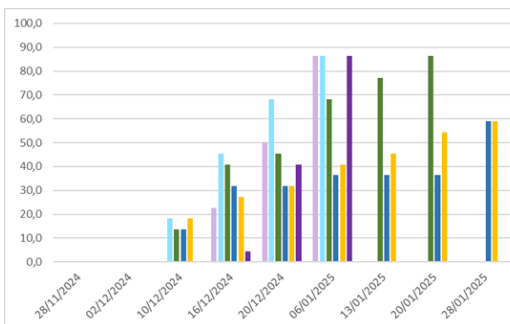


Photo n°5

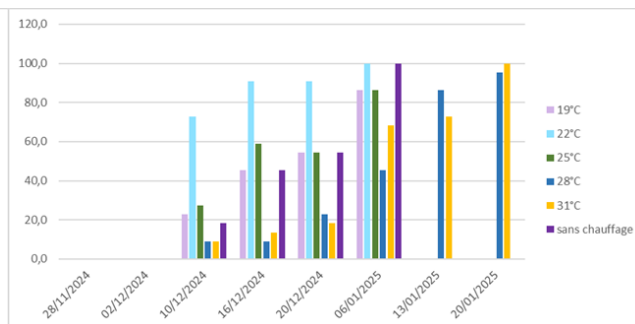
Figure n°21 : Dispositifs de bouturage par aéroponie utilisés L'iteipmai. Photo n°1 : aspect général des dispositifs. Photo n°2 : dispositifs équipés de capots pour limiter la transpiration des boutures. Photo n°3 : Intérieur du bac de bouturage avec le système de brumisation. Photo n°4 : support des boutures. Photo n°5 : boutures enracinées empotées en godet.

### Essais « Température de l'eau brumisé dans le compartiment racinaire »

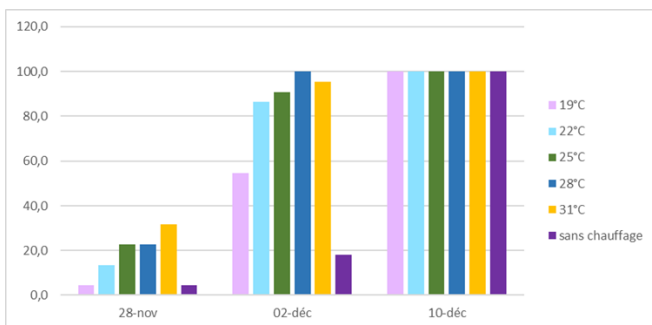
Ces essais ont été réalisés au cours de l'automne 2024 et de l'hiver 2025. Les pourcentages obtenus de boutures enracinées en fonction de la température de l'eau servant à brumiser les racines sont illustrés dans les figures ci-dessous (figure n°22).



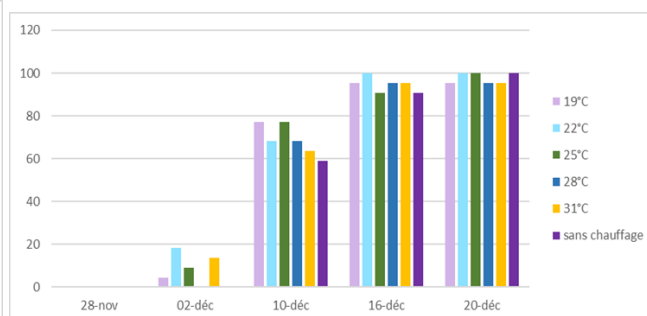
Lavande



Lavandin



Thym T36



Thym 5-55

Figure n°22

Les effets de la température de l'eau brumisée sont différents d'une espèce et d'une variété à l'autre. Toutefois, il apparait nettement que la température optimale de l'eau brumisée au niveau des racines est de 22°C. Cette température permet d'accélérer l'enracinement et d'atteindre plus rapidement un % de boutures enracinées élevé. Sans chauffage de l'eau brumisée ou lorsque cette température est trop élevée (> à 28°C), la vitesse d'enracinement des boutures est fortement ralentie et le % de boutures enracinées peut ne pas être maximisé. A 19°C et 25°C, l'effet est plus ou moins intéressant selon les taxons. Dans ces essais, une bonne croissance des parties aériennes a été observée pendant le bouturage ainsi qu'une bonne reprise au champ des jeunes plants après plantation en pleine terre.

### Essais « fréquence de brumisation dans le compartiment racinaire »

Ces essais ont été réalisés en mai et juillet 2024. Les pourcentages obtenus de boutures enracinées en fonction de la fréquence et du temps de brumisation de la base des boutures puis des racines après leur apparition dans le compartiment racinaire sont illustrés dans les figures ci-dessous (figure n°23). 3 modalités de brumisation ont été comparées : 10 secondes toutes les minutes, 1 minute toutes les 10 minutes et 30 secondes toutes les 3 minutes.

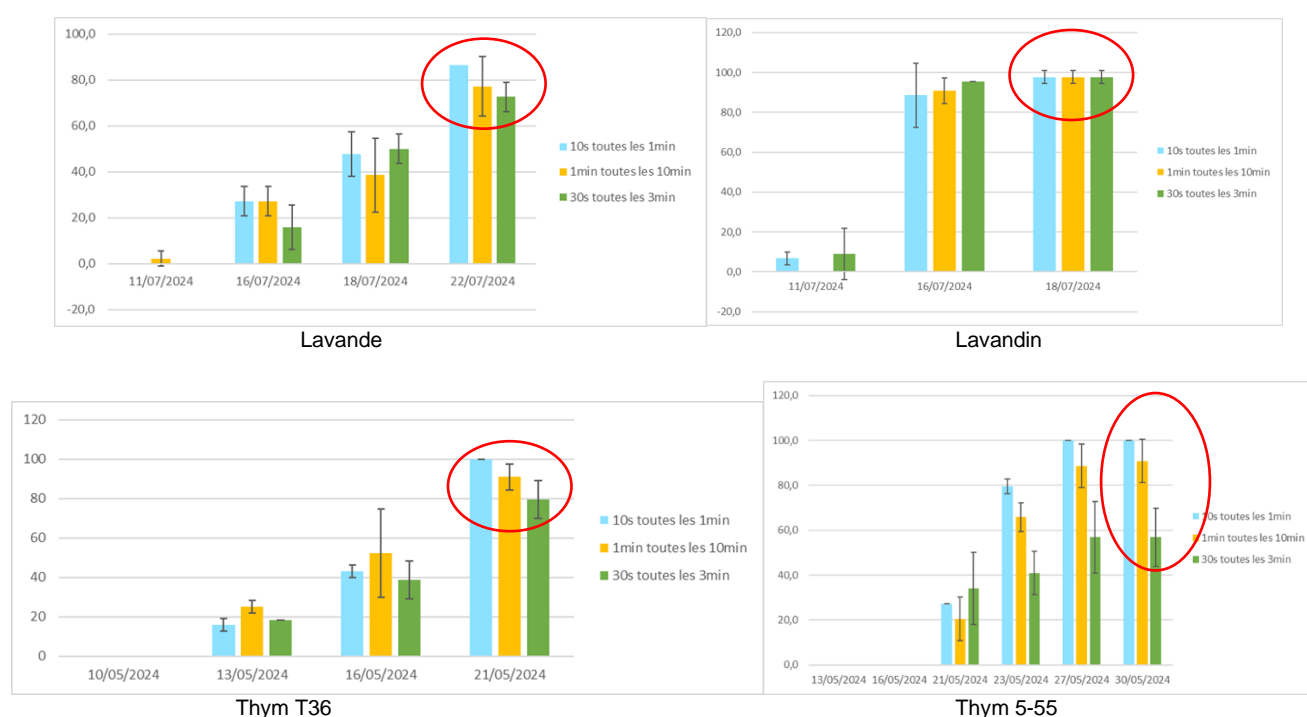
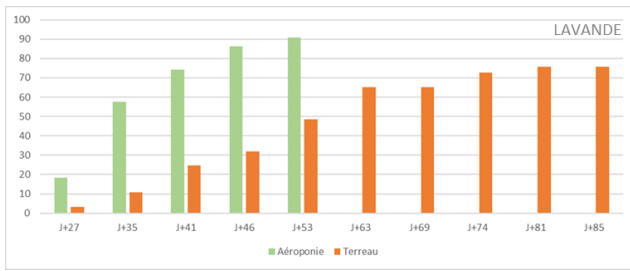


Figure n°23

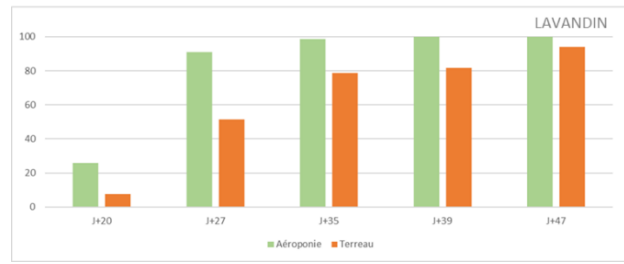
En période estivale, dans le contexte de réalisation de cette étude (sous tunnel plastique), le meilleur comportement des boutures est obtenu avec une brumisation de 10 secondes toutes les minutes. Mais, il existe des différences de comportement selon les taxons. Pour le lavandin, peu de différences sont observées entre les modalités alors que pour la souche de thym 5-55, l'effet est important et il est nécessaire d'augmenter la fréquence des brumisations. La lavande et le thym T36 ont des comportements intermédiaires. A cette période, la vitesse d'enracinement des boutures est très rapide.

### Essais de comparaison de 2 modes de bouturage

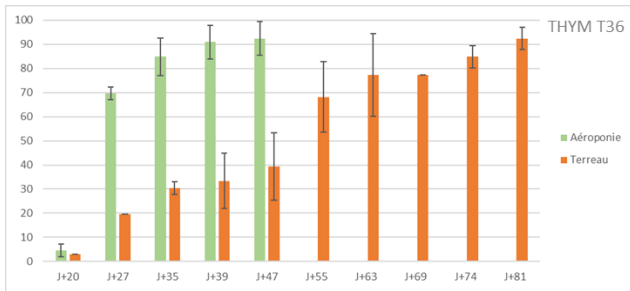
Ces essais ont été réalisés en février 2025. Dans ces essais, le bouturage par aéroponie est comparé à la technique de bouturage de référence en plaque d'alvéoles remplies de substrat. Le taux d'enracinement obtenu après empotage des boutures enracinées en godets remplis de substrat en fonction du mode de bouturage (aéroponie / sur substrat) sont illustrés dans les figures ci-dessous.



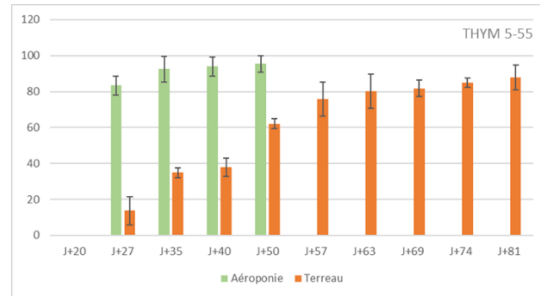
Lavande



Lavandin



Thym T36



Thym 5-55

Figure n°24

Au cours de ces essais, il a été observé qu'avec le bouturage par aéroponie, l'enracinement des jeunes plants une fois qu'ils ont été empotés en godet est plus rapide que lorsque le bouturage est réalisé en alvéole de substrat. De même, la croissance des parties aériennes est également plus rapide avec le bouturage par aéroponie.



Modalité bouturage par Aéroponie



Modalité bouturage en substrat

Figure n°25 : Jeunes plants de lavandin en godet, après lavage des racines

Par ailleurs, les essais de plantation au champ des jeunes plants n'a pas montré de problème de reprise pour les jeunes plants issus du bouturage par aéroponie.

Ces premiers essais montrent que la technique du bouturage par aéroponie semble prometteuse pour les cultures PPAM. L'exploration de cette technique serait à poursuivre pour mieux évaluer cette technique et continuer la comparaison avec les méthodes classiques de bouturage, notamment en lavande où des pertes importantes sont enregistrées lors de la multiplication.

## Action 3 : analyse économique et acceptabilité du procédé

### **Tâche 3.1 : Etude de la viabilité économique et de la durabilité d'une production industrielle de jeunes plants par aéroponie.**

#### **a) Objectif**

L'objectif de cette action était de déterminer le coût de fonctionnement des équipements d'aéroponie pour le bouturage des végétaux, les charges opérationnelles et le temps de travail, afin de fournir des éléments pour juger de la rentabilité et des perspectives de cette nouvelle technique de multiplication.

#### **b) Méthodologie de l'étude**

A cet effet, des données techniques et économiques ont été collectées lors des expérimentations de bouturage par aéroponie réalisées par le CATE, PLFP et le CDHRC avec leur dispositif pilote.

Un outil de saisie et de calcul de coût a été développé par ASTREDHOR sous la forme d'un tableur Excel. Les données technico-économiques y sont saisies par « séries de bouturage ». Une série est constituée d'un lot de boutures d'une même espèce mises à enraciner au même moment puis empotées en godets. Le calcul de coût est ramené au jeune plant commercialisable en godet. Deux types de perte sont intégrés : les pertes au moment de l'enracinement des boutures dans les dispositifs d'aéroponie et les pertes postérieures à l'empotage des boutures en racines nues dans les godets jusqu'au stade de la commercialisation des jeunes plants.

A partir des données saisies, l'outil calcule directement pour chaque série les charges opérationnelles en euros par jeune plant valorisable. Les charges opérationnelles prises en compte sont les coûts de main d'œuvre, les frais de fonctionnement du dispositif d'aéroponie (énergie, eau, correction du pH, fertilisation ...), les consommables (hormones d'enracinement, produits de biocontrôle et phytosanitaire, auxiliaires, godets, substrat, engrais...).

Pour permettre la faisabilité des calculs, des choix méthodologiques ont été réalisés lors de la conception de cet outil :

- L'outil calcule les charges opérationnelles qui s'appliquent directement aux boutures. Les charges de structure, dépendantes de chaque entreprise, ne sont pas estimées. Il ne s'agit donc pas d'un coût de production complet.

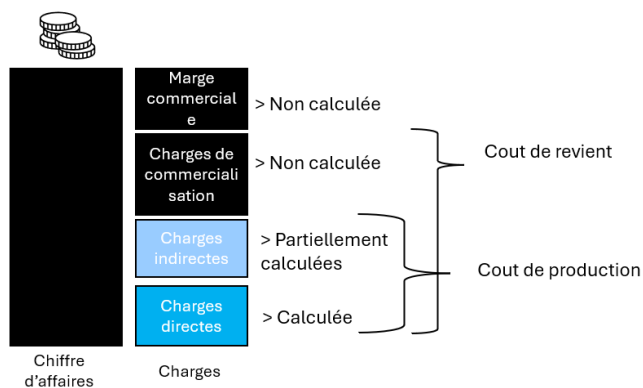


Figure n°26 : Mode de calcul des coûts.

- Les limites du système : l'outil considère les charges qui s'appliquent aux étapes de production suivante : prélèvement des boutures, culture dans le dispositif d'aéroponie, sortie des boutures et empotage en godets. La culture de pieds mère est exclue, de même que l'entretien de plants après leur mise en pots (même si le taux de perte pendant cette phase est intégré). L'énergie pour le chauffage des abris où sont installés les dispositifs d'aéroponie n'est pas pris en compte car, pour ces essais, il s'agit d'abris non chauffés.
- Le coût du fonctionnement du dispositif aéroponique est calculé par jour de fonctionnement : les données enregistrées sont la consommation d'électricité et d'eau, ainsi que de solutions de fertilisation et de régulation du pH. L'outil est construit de telle façon que seule la fraction du coût de fonctionnement quotidien de l'outil est affectée à la série proportionnellement à la surface occupée et à la durée

d'occupation du lot. Il est important de tenir compte de cette clé de répartition et de s'assurer que l'ensemble des charges de fonctionnement du système seront bien « portées » par les cultures.

- Concernant les différents intrants :
  - o La culture des pied mère n'a pas été prise en compte.
  - o Les autres charges qui peuvent être saisies sont : les hormones de bouturage, les traitements ou produits de lutte contre les ravageurs (même si aucune des séries n'a eu recours à des produits de traitement).
  - o Les consommables (pots, substrat, fertilisation) nécessaires au rempotage des plants.

Pour les applications d'hormones de bouturage, la technique employée a consisté à tremper la base des boutures pendant 4 heures dans une solution d'hormones à la concentration adaptée à l'espèce bouturée.

Les charges calculées sont présentées sous forme de graphiques dans un onglet dédié. Cet outil est disponible sur demande auprès d'ASTREDHOR.

Pour le calcul des coûts de main d'œuvre, les temps de travaux ont été enregistrés par série, les opérations prises en compte ont été les suivantes :

- Pour la culture en aéroponie
  - o Le prélèvement sur les pieds mères et préparation des boutures en comptant la préparation du chantier et le rangement.
  - o Le traitement hormonal et trempage des boutures le cas échéant en comptant la préparation du chantier, le trempage, le rangement du chantier.
  - o Le repiquage : l'installation des plants dans le dispositif.
  - o Les mise en route, vérification et entretien du dispositif d'aéroponie.
  - o Le suivi des plantes, la surveillance et si nécessaire, les traitements.
  - o La sortie des boutures racinées à la fin de la culture.
- Pour l'empotage
  - o L'empotage des boutures racinées, y compris la préparation et le nettoyage du chantier.
  - o La mise en place des boutures empotées dans les zones de culture.

Le coût horaire de travail retenu pour les calculs a été de 18 €/heure (d'après les données de l'Observatoire économique et financier des entreprises horticoles et de pépinière. France AgriMer, données 2023).

Pour le calcul des coûts d'énergie, un prix moyen du KWh électrique sur l'année a été utilisé. Mais, pour chaque série, la consommation d'énergie par le dispositif d'aéroponie a été mesurée du début à la fin de la période de bouturage. L'effet de la durée d'enracinement et la période d'enracinement sur la consommation d'énergie de chaque série a donc été pris en compte.

Ce modèle de calcul a été appliqué à 128 séries de boutures réalisées par les stations CATE, CDHRC et PLFP au cours des années 2024 et 2025 pour lesquelles les données de fonctionnement des dispositifs pilotes et les données concernant l'enracinement des boutures ont été enregistrées.

Site	2024	2025
CATE	29 séries	29 séries
CDHR Centre	48 séries	8 séries
PLFP	9 séries	5 séries

Tableau n°10 : Nombre de séries de bouturage utilisées pour l'analyse économique du bouturage par aéroponie.

Ces séries appartiennent à 34 taxons différents. Cette diversité a permis d'observer l'effet de dates de bouturage, de durées d'enracinement, de réussite du bouturage et d'observer l'impact du temps de travail, de l'énergie et de l'utilisation de différents intrants sur les charges opérationnelles et de main d'œuvre par boutures valorisées en godets (soit des boutures enracinées, empotées en godets biodégradables et valorisables).

### c) Principaux résultats de l'analyse économique

#### 3.1.1 – Caractéristiques des dispositifs d'aéroponie

Les surfaces et nombres maximum de boutures portées par les dispositifs des 3 stations sont les suivantes :

Caractéristiques du dispositif	PLFP	CATE	CDHR
Surface de la table de bouturage	4 m <sup>2</sup>	5 m <sup>2</sup>	4,5 m <sup>2</sup>
Nombre maximum de boutures /série	1200	4340	4500
Densité de boutures réalisées /m <sup>2</sup> de table de bouturage	300 boutures /m <sup>2</sup>	868 boutures /m <sup>2</sup>	1 000 à 2 000 boutures /m <sup>2</sup>

Tableau n°11 : caractéristiques des dispositifs pilotes de bouturage par aéroponie.

### 3.1.2 – Frais de fonctionnement des dispositifs d'aéroponie

Le fonctionnement quotidien des dispositifs d'aéroponie génère des dépenses en eau et en électricité, et dans une moindre mesure en produits pour la régulation du pH, la désinfection et la fertilisation. Les consommations varient selon les dispositifs mais également selon la saison. Par exemple, pour le dispositif du CATE, l'eau est chauffée en hiver (mais pas la serre).

Les coûts de fonctionnement engendrés sont tributaires des coûts de l'électricité et de l'eau. Ainsi, pour cette étude, le coût du kWh électrique (hors abonnement) a été fixé à 0,15 €/KWh et celui de l'eau à 2,70 €/m<sup>3</sup>. Les consommations d'eau et d'électricité sont décrites dans le tableau suivant. Bien que la consommation électrique du dispositif d'aéroponie soit affectée par le chauffage de l'eau brumisée en période hivernale (en particulier pour le dispositif du CATE), un coût moyen de fonctionnement par jour a été retenu. Ce coût moyen de fonctionnement du dispositif d'aéroponie sert ensuite à calculer les frais de fonctionnement liés au dispositif d'aéroponie pour chaque série de boutures réalisée en fonction de sa durée d'enracinement et la surface qu'elle occupe dans le dispositif.

Fonctionnement du dispositif	PLFP	CATE	CDHR
Consommation d'eau m <sup>3</sup> /Jour	0,060	0,001	0,01
Consommation élec kWh/jour en moyenne	1,670	5,86	2,16
- Avril-juillet	1,6	4,77	-
- Septembre-décembre	1,78	8,44	-
<b>Coût de fonctionnement €/jour</b>	<b>0,413 €</b>	<b>0,882 €</b>	<b>0,351 €</b>

Tableau n°12 : coût de fonctionnement /jour des dispositifs aéroponiques en 2024 et 2025

### 3.1.3 – Coûts de main d'oeuvre

Les coûts de main d'oeuvre les plus importants sont liés à la préparation des boutures, à leur mise en place sur les dispositifs d'aéroponie, à la récolte des boutures enracinées puis à l'empotage des boutures enracinées en godets. La durée d'enracinement des boutures intervient peu dans le coût de main d'oeuvre affecté à la série de boutures. Suite aux enregistrements de temps de travaux et aux calculs de coût effectués, les références moyennes utilisées sont les suivantes :

Coûts de main d'oeuvre en aéroponie	PLFP	CATE	CDHR
Coût horaire de travail €/heure	18 €/h	18 €/h	18 €/h
Bouturage : Temps de travail en heure pour 100 boutures mises en culture	1,0 h	0,94 h	1,44 h (1,6 avec hormone, 1,2 sans hormone)
Empotage en godets : Temps de travail en heure pour 100 boutures empotées	1,4 h	1,25 h	0,9 h
<b>Coûts de main d'oeuvre total /100 boutures bouturées et empotées</b>	<b>45 €</b>	<b>40 €</b>	<b>42 €</b>

Tableau n°13 : coût de main d'oeuvre /100 boutures mises en place sur les dispositifs d'aéroponie et empotées en godet après enracinement

Dans le processus de production en aéroponie, 40 à 60 % du temps de travail est lié à l'empotage en godets.

Par comparaison, le bouturage conventionnel en mottes de culture (en substrat) nécessite 1,78 heures de travail /100 boutures mises en place et empotées en godets là où le temps de travail nécessaire avec le bouturage par aéroponie s'établit à 2,19 heures/100 boutures mises en place et empotées en godets (pour les mêmes espèces bouturées et les mêmes types de boutures). Le bouturage par aéroponie nécessite donc 23 % de temps de travail en plus que le bouturage en mottes de culture. Le temps de travail est quasiment équivalent pour ce qui concerne la préparation des boutures et l'installation sur les dispositifs d'aéroponie mais requière plus de temps pour l'empotage en godets car les boutures enracinées sont plus délicates à empoter. Le coût final de main d'œuvre/jeune plant valorisé qui est calculé par l'outil tient compte des pertes lors du bouturage ou après l'empotage en godets. Par ailleurs, la durée d'enracinement moyenne est plus courte en aéroponie qu'en substrat (75 jours contre 120 jours pour le même cortège d'espèces et pour des bouturages dans les mêmes conditions).

Comme le montre le tableau n° 5, le temps de travail est un facteur déterminant des charges opérationnelles et en représente 73 % en moyenne. La mise en culture des boutures en aéroponie (prélèvement des boutures sur pieds-mères, éventuel traitement hormonal, mise en place dans le système aéroponique) demande entre 0,94 et 1,44 heure pour 100 boutures selon les dispositifs testés, tandis que l'empotage (à la sortie du dispositif) varie de 0,9 à 1,4 heure pour 100 boutures selon les sites d'expérimentation.

### 3.1.4 – Total des charges opérationnelles et de main d'œuvre liées à la production de plants en aéroponie. Effet de la réussite du bouturage.

La mise en œuvre de l'outil de saisie et de calcul construit au cours de ce projet avec une affectation des charges correspondantes pour 128 séries de boutures réalisées sur les 3 dispositifs de bouturage par aéroponie testés par le CATE, PLFP et le CDHRC ont permis de calculer un montant moyen de charges opérationnelles et de main d'œuvre de 0,71 € /jeune plant valorisé en godets (tableau n° 5 et figure n° 2). Ce calcul tient compte des pertes rencontrées lors du bouturage et après empotage en godets.

Statistiques	Durée d'enracinement en aéroponie (en jours)	Taux de perte en aéroponie	Taux de perte après l'empotage en godet	Taux de perte total	charges opérationnelles €/jeune plant valorisable					en % des charges opérationnelles			
					Travail / jeune plant valorisable	Hormone / jeune plant valorisable	Consommables /jeune plant valorisable	Fonctionnement du dispositif / jeune plant valorisable	Total des charges opérationnelles /jeune plant valorisable	Travail	Hormone d'enracinement	Consommables	Fonctionnement du dispositif d'aéroponie
Moyenne	60	50%	4%	51%	0,489	0,067	0,070	0,092	0,717	73%	7%	10%	10%
Ecart type	39	37%	14%	37%	0,073	0,103	0,020	0,134	0,252	14%	10%	3%	11%
1er quartile Taux de perte <20%	52	5%	0%	5%	0,403	0,024	0,065	0,031	0,523	78%	4%	13%	5%
2ème quartile 21%<Tx de perte <46%	45	31%	3%	34%	0,458	0,032	0,069	0,032	0,590	78%	5%	12%	5%
3ème quartile 47%<Tx de perte <93%	62	68%	7%	75%	0,534	0,073	0,075	0,090	0,771	72%	8%	10%	10%
4ème quartile Tx de perte >94%	86	88%	10%	98%	0,573	0,149	0,070	0,232	1,025	61%	12%	7%	20%

Tableau n° 14 : charges opérationnelles et de main d'œuvre /bouture valorisée en godet.

Le coût de production des boutures racinées en aéroponie dépend fortement du taux de perte lors du bouturage ou après l'empotage en godets. **Ainsi, avec un taux de perte inférieur à 20 %, les charges opérationnelles et de main d'œuvre se situent à 0.52 € par jeune plant valorisable.** Ces charges incluent le fonctionnement du dispositif, les consommables pour l'empotage et surtout la main-d'œuvre, qui représente alors 78 % des charges opérationnelles totales.

Pour ce niveau de perte, le coût de l'utilisation d'hormones de bouturage, des consommables et des charges de fonctionnement du dispositif d'aéroponie (énergie...) représente respectivement 4 %, 13 % et 5 % des charges opérationnelles et de main d'œuvre.

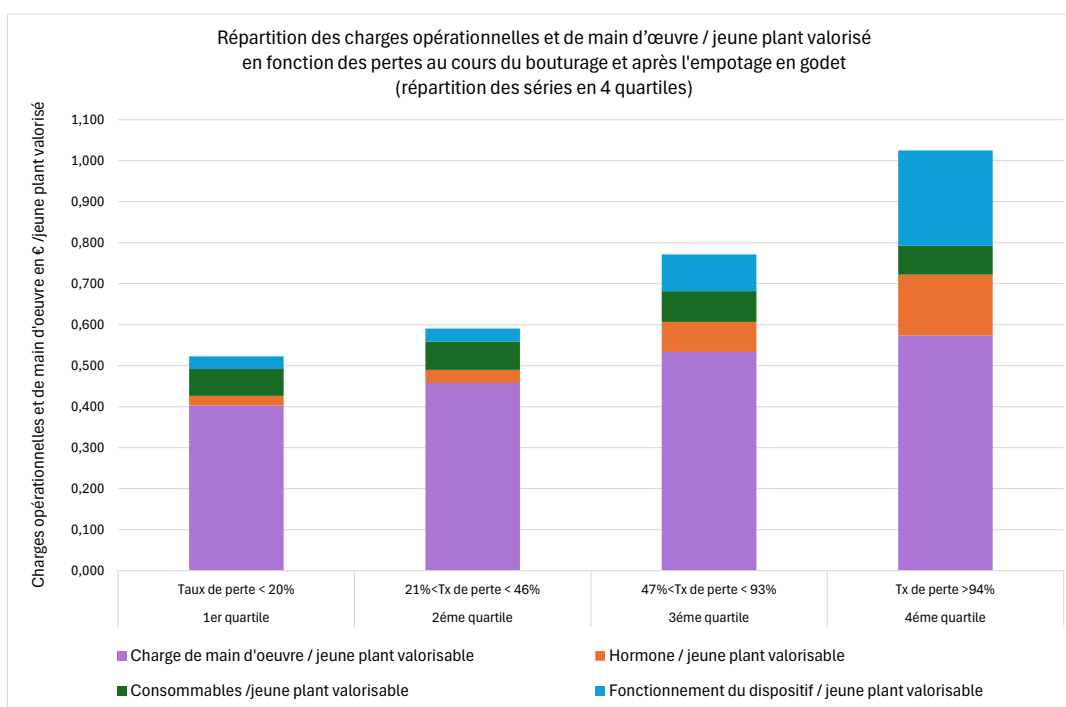


Figure n°27 : charges opérationnelles et de main d'œuvre /bouture valorisée en godet. Moyennes des séries représentées par quartile en fonction du taux de perte enregistré.

**Un facteur déterminant de la maîtrise des coûts est la réussite du bouturage.** Aux cours de ces essais, une grande variabilité de réussite du bouturage des différentes séries testées a été observée. Ces résultats sont liés aux essais eux même puisque, selon les espèces testées, différentes modalités de bouturage ont été mises en place (différents types et stades de boutures, différentes périodes de bouturage, différentes concentrations d'auxine...) avec des réussites variées. De plus, ces essais ont été réalisés alors que les dispositifs d'aéroponie étaient encore en cours d'évaluation avec, dans un certain nombre de cas, la nécessité de résoudre des problèmes de fonctionnement ou d'optimisation ayant eu des conséquences sur la réussite du bouturage.

Malgré tout, l'exploitation de ces données permet de montrer les effets des pertes au cours du bouturage et après l'empotage sur le montant des charges opérationnelles et de main œuvre / jeune plant valorisable en fin de processus de production. L'ensemble des coûts est alors affecté aux seules boutures restantes en fin de processus de production.

Taux de perte	€/plant valorisable
Moins de 20 %	0,52 €
De 20 à 46 %	0,59 €
De 47% à 93 %	0,77 €

Tableau n°15 : Charges opérationnelles et de main d'œuvre /bouture valorisée en godet en fonction du taux de perte au bouturage et à l'empotage en godet

### 3.1.5 – Autres facteurs de variation des charges opérationnelles et de main-d'oeuvre

On note également des effets importants des facteurs suivants qui diversifient les situations :

#### Utilisation d'hormones de bouturage :

Ainsi, l'utilisation d'une forte concentration d'auxine (1 000 à 2 000 ppm en trempage de la base des boutures) peut influencer de façon non négligeable le montant des charges opérationnelles. Cet effet sur les coûts est plus ou moins marqué selon la réponse de l'espèce (et du type de bouture) aux auxines. Si l'utilisation d'une forte concentration d'auxines permet d'augmenter très fortement la réussite du bouturage, l'effet du coût de l'auxine sur le coût final sera atténué (exemple : *Punica granatum*). En revanche, si l'effet de l'auxine est modéré, son utilisation se traduit par une augmentation du coût final/bouture valorisée malgré un taux de perte plus faible. C'est l'exemple des *Ceanothus* dans ces essais où un coût plus faible /bouture valorisée a été obtenu dans la modalité non traitée malgré un taux de perte un peu plus élevé que dans les modalités traitées. Pour les *Citrus* ou les *Syringa*, c'est une situation où on utilise une concentration intermédiaire d'auxines (500 ppm) qui est

préférable. Une optimisation est à trouver pour ce facteur de production. Des économies d'échelle sont également à attendre en optimisant les volumes de solution par rapport au nombre de boutures à traiter (en aéroponie, les auxines doivent être appliquées par trempage de la base des boutures dans une solution) car dans ces essais le coût d'utilisation des auxines a été influencé par le volume de solution utilisé par rapport à la taille des séries bouturées. Il serait moins impactant pour des séries plus grandes.

#### **Effet du chauffage de l'eau brumisée :**

Pour les espèces bouturées en période hivernale et à enracinement lent (>90 jours), le coût du chauffage de la solution brumisée en aéroponie n'est pas à négliger mais peut être amorti si l'augmentation du % de boutures récoltées grâce au chauffage est proportionnelle au coût engagé. Cela a été le cas dans ces essais pour *Camelia sinensis* bouturé à l'automne. En aéroponie, pour cette espèce, avec une concentration d'auxine élevée, on peut obtenir un enracinement à 100 % (perte nulle) alors que le bouturage en mottes est moins performant (15 à 21 % de perte). Finalement, le montant des charges opérationnelles /bouture valorisée est équivalent pour les 2 techniques de multiplication (0,55 € /bouture valorisée dont 6 à 11 % d'énergie) et cela malgré que le KWh d'électricité coûte environ 2 fois plus cher qu'un KWh de gaz.

Cet impact est aussi modéré si la réponse de l'espèce au chauffage se traduit par une durée d'enracinement relativement courte. Le *Citrus* répond à ce cas de figure (enracinement en 38 jours en hiver en situation bien chauffée). L'énergie représente alors 3 à 6 % du coût de production.

Pour être complète, la comparaison du bouturage par aéroponie et du bouturage sur substrat doit intégrer les % de perte respectifs de chaque méthode. En effet, pour le bouturage sur substrat, en situation confinée ou sous fog, le taux d'échecs peut être accentué par des maladies. De plus, pour simplifier le modèle, le coût du KWh électrique a été moyenné sur l'année. Or, selon les contrats d'approvisionnement, le coût du KWh d'électricité peut être plus élevé en hiver qu'en été.

#### **a) La question de l'investissement**

Les prototypes de dispositifs de bouturage par aéroponies qui ont été étudiés et mis au point dans ce projet présentent des coûts d'acquisition significatifs : entre 15 800 € et 20 200 €HT selon le modèle et la station expérimentale. Mais, il s'agit de prototypes uniques, complètement nouveaux, fabriqués spécialement pour ce projet. De ce fait, ils n'ont pas bénéficié d'économie d'échelle pour leur fabrication.

De plus, pour ces dispositifs, il est nécessaire de distinguer 2 composantes de coût distinctes :

- Une partie correspondant à la table de bouturage sur laquelle les boutures à enraciner sont disposées dans des supports. Le montant d'investissement pour cette partie est proportionnel à sa surface. Dans ce projet, les surfaces retenues ont été de 4 à 5 m<sup>2</sup>, soit la possibilité de cultiver 1 200 à 9 000 boutures / série selon la densité permise par les supports.
- Une partie correspondant au module de stockage d'eau, à son traitement (chauffage, oxygénation, filtration ...), au pompage, à la régulation et au contrôle-commande du dispositif. A la différence de la table de bouturage, le montant d'investissement de cette partie n'est pas proportionnel (ou peu) à la surface de bouturage. Or, le dimensionnement de ces modules (lié à des standards de fabrication) permettrait d'accueillir des tables de bouturages 4 à 6 fois plus grandes.

Aussi, les prototypes mis en place pourraient bénéficier au niveau des coûts d'acquisition d'une forte économie d'échelle associée à la surface de table installée, diminuant d'autant le coût d'acquisition /m<sup>2</sup> et /bouture.

A l'investissement des prototypes, il est nécessaire d'ajouter des consommables à renouveler tous les deux à trois ans tels que les matériaux servant à la fabrication des supports de boutures. Pour le dispositif du CATE, l'achat de matériaux pour l'autoconstruction de la dernière génération de supports de boutures proposée s'est élevé à 100 € HT /m<sup>2</sup> de table de bouturage.

L'intégration du montant des investissements dans le coût de production /bouture nécessite de préciser :

- une durée d'amortissement de l'équipement d'aéroponie.
- la quantité de boutures réalisées /an.

Dans le cas du prototype installé au CATE, les effets de ces facteurs sur le montant d'investissement par bouture mise en place sont présentés dans la figure suivante (amortissement linéaire) :

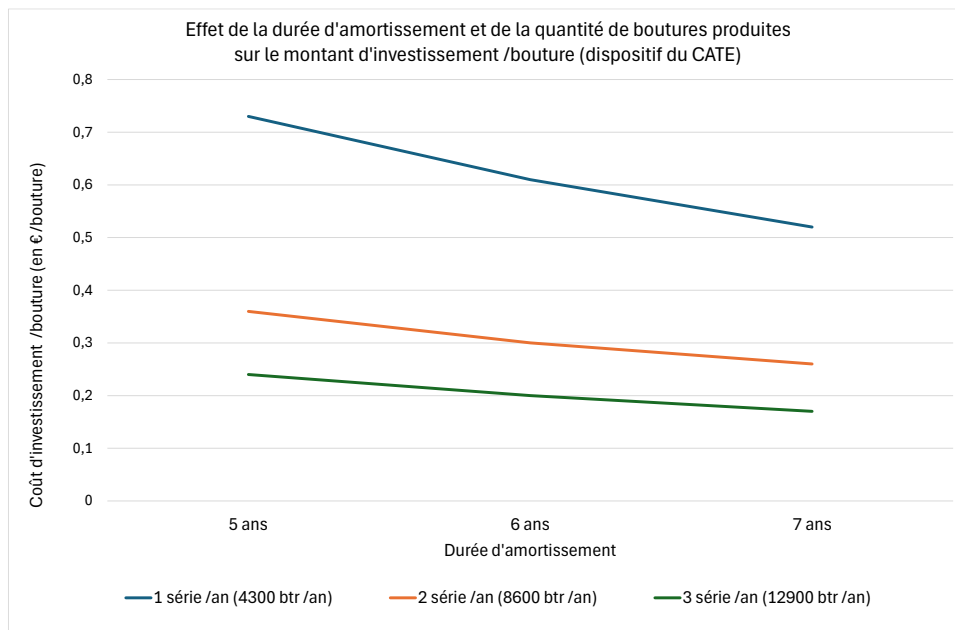


Figure n°28 : Effet de la durée d'amortissement et du nombre de séries produites /an sur le montant des investissement /bouture.

L'impact de la durée d'amortissement sur le coût de production est relativement fort dans le cas où l'utilisation du dispositif est peu importante (1 série de bouture /an). Une utilisation plus intensive limite cet effet.

Pour aboutir à un effet maîtrisé du coût des investissements par bouture, il est nécessaire d'utiliser le dispositif de bouturage pour produire plusieurs séries de boutures par an. Dans le cas du dispositif d'aéroponie installé au CATE (à 860 boutures /m<sup>2</sup>), pour une durée d'amortissement de 6 ans et la production de 2 séries de boutures /an, le coût d'investissement /bouture atteint 0,20 € HT /bouture (sans tenir compte de pertes éventuelles en cours de bouturage).

Pour les espèces s'enracinant rapidement, il est envisageable d'augmenter significativement le nombre de séries de boutures produites chaque année (4 à 6) de façon à atténuer ce coût.

Par ailleurs, ces calculs de coût montrent qu'il est important de prendre en considération la densité de bouture qu'il est possible de multiplier sur le dispositif d'aéroponie. Cette densité doit être maximisée (jusqu'à un maximum technique acceptable) pour limiter l'impact de l'investissement sur le coût de production.

## b) Conclusion de l'analyse économique

### Conclusion sur les charges opérationnelles et de main d'oeuvre

Dans tous les cas de figure, le taux de réussite du bouturage est déterminant et influence fortement le montant des charges opérationnelles et de main d'oeuvre /bouture valorisée en godets. Mais, globalement, le montant des charges opérationnelles et de main d'oeuvre /bouture valorisée en godets se situe entre 0,50 et 0,60 € / bouture lorsque le taux de perte lors du bouturage et après le repotage en godets reste acceptable, c'est-à-dire inférieur à 20 %. A ce niveau de perte, l'essentiel des charges est constitué par la main d'oeuvre (78 %).

On note également des effets importants de l'utilisation d'hormones de bouturage et de l'énergie pour le chauffage de la solution brumisée en période hivernale. Mais, pour ces facteurs de production, la réponse de l'espèce constitue un point à prendre en considération. Si les coûts engendrés par leur utilisation peuvent être amortis de façon plus que proportionnelle par un plus grand nombre de boutures produites (du fait d'une diminution des pertes), le coût résultant par unité produite se trouvera diminué.

Lorsque des comparaisons ont été possibles entre bouturage en mottes et bouturage en aéroponie, il a été possible de constater que les charges opérationnelles /bouture valorisable en godets ne sont pas d'un montant fondamentalement différent. Elles sont identiques ou augmentées d'environ 10 % en aéroponie par rapport au bouturage en mottes lorsqu'une amélioration du résultat du bouturage est observée. La réussite du bouturage pour maîtriser dans les 2 cas de figure les charges opérationnelles et de main d'oeuvre reste fondamentale.

## Conclusion sur l'investissement

Il apparaît que le montant de l'investissement associé à la mise en œuvre du bouturage par aéroponie n'est pas un facteur à négliger car il impacte de façon significative le coût de production par bouture produite. Dans le cas du prototype mis en place au CATE pour ce projet (5 m<sup>2</sup>, 868 boutures /m<sup>2</sup>, montant d'acquisition : 16 000 €), le coût de l'amortissement de l'équipement / bouture s'élève à 0,20 € HT pour une durée d'amortissement de 6 ans et dans le cas où 3 séries de boutures sont réalisées chaque année.

Cette valeur est toutefois à relativiser car l'investissement réalisé peut bénéficier d'une forte économie d'échelle puisque le module de traitement de l'eau et de contrôle peut servir pour une surface de table de bouturage 4 à 6 fois plus grande.

De plus, l'augmentation des quantités de boutures mises en place, en augmentant le nombre de séries de boutures réalisées chaque année, est un moyen de limiter l'impact de cet investissement sur le coût de production. Mais, cette possibilité n'est envisageable que pour les espèces s'enracinant rapidement.

L'impact du montant de l'investissement sera en revanche à modérer pour les espèces où le bouturage par aéroponie permet d'améliorer de façon significative la réussite de la multiplication par rapport à celle obtenue avec le bouturage sur substrat. La multiplication sera alors possible mais elle ne se fera pas forcément à un coût faible.

Par ailleurs, les calculs de coût réalisés montrent que la conception d'un dispositif de bouturage par aéroponie doit chercher à maximiser la densité de boutures qu'il est possible de multiplier (jusqu'à un maximum technique acceptable) afin de limiter l'impact de l'investissement sur le coût de production.

### **Tâche 3.2 : Etude de l'acceptabilité de l'innovation et de ces retombées socio-économiques.**

#### **a) Méthodologie**

La méthodologie adoptée pour cette tâche comporte 3 points :

- **Faire un état des lieux de la filière jeune plant française**

Pour cela, les données des douanes sur les échanges de jeunes plants et les données de l'observatoire de la production horticole et de pépinière française de FranceAgriMer sont utilisées ainsi que des échanges informels avec les producteurs de jeunes plants et monsieur Brand Wagenaar.

- **Réalisation d'une enquête sur les stratégies d'approvisionnement en jeunes plants des producteurs français**

Une enquête nationale a été menée en juin 2025 auprès des producteurs éleveurs français. Les données fournies par les 60 producteurs ayant répondu à l'enquête ont été analysés (sur environ 500 producteurs questionnés).

- **Etude de l'acceptabilité de l'aéroponie pour les cibles potentielles**

Cette étude vise à préciser les freins, les verrous qui pourraient s'opposer au développement de cette technique ou au contraire, les opportunités qu'elle présente grâce à des échanges avec les producteurs (multiplicateurs et éleveurs).

#### **b) Résultats**

##### **3.2.1. Etat des lieux de la filière jeune plant française**

Les entreprises françaises spécialisées en jeunes plants sont peu nombreuses mais d'envergure nationale, voire européenne. Malgré tout, on assiste au niveau national à une lente érosion du secteur des jeunes plants pour les productions ornementales.

## 2 741 entreprises horticoles françaises en 2023

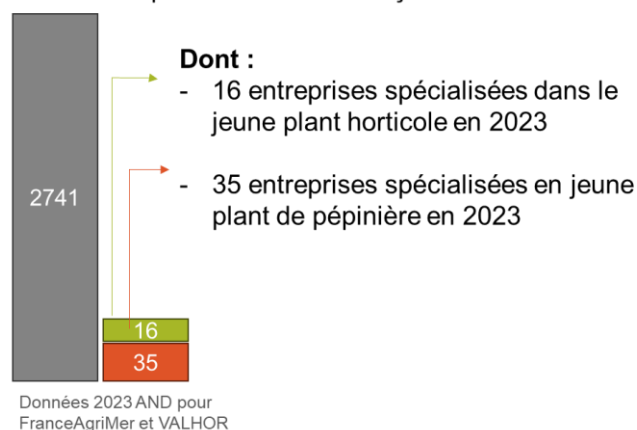


Figure n°29 : nombre d'entreprises horticoles et de pépinière en France (source : AND / France AgriMer et Val'Hor, 2023)

La production de jeunes plants en France représente environ 7 % du chiffre d'affaires horticole français. En ce qui concerne le jeune plant de pépinière, le chiffre d'affaires est en croissance depuis dix ans. Notons que la production est réalisée aussi bien par des entreprises spécialisées que non spécialisées (50-50) : 35 entreprises spécialisées produisent la moitié du chiffre d'affaires. Celles-ci sont de taille importante et s'adressent à un marché national et européen (19 %). En ce qui concerne le jeune plant horticole, le chiffre d'affaires est en hausse depuis la période Covid après une décennie de recul. Les entreprises spécialisées produisent les trois quarts du chiffre d'affaires. Elles sont peu nombreuses (16 en 2023). Ces entreprises sont de taille très importante et présentes à l'export (30 % de leur chiffre d'affaires).

## Chiffre d'affaires (k€) en production de jeunes plant au global et pour les entreprises spécialisées (données 2023)

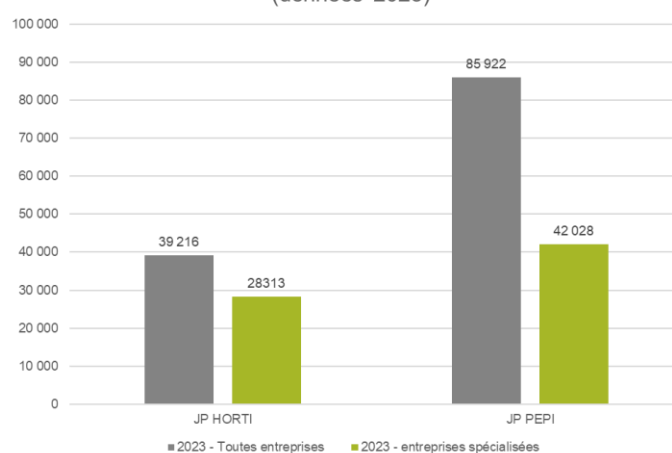


Figure n°30 : Chiffres d'affaires en production de jeunes plants (source : AND / France AgriMer et Val'Hor, 2023)

**Le paradoxe français dans ce domaine est que la France exporte plus de jeunes plants de pépinière qu'elle n'en importe, mais la balance commerciale est négative.**

Depuis 2022, les échanges de jeunes plants de pépinière et de boutures non racinées connaissent une situation originale avec une balance commerciale négative en valeur mais positive en volume. Ainsi la France exporte deux fois plus de jeunes plants qu'elle n'en importe (les quantités de boutures non racinées ne sont pas décomptées dans cette statistique). Mais la valeur des plants exportés est plus faible que celle des plants importés.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette situation (Widehem et al., 2009 (1)) :

- *La valeur technologique des plants exportés par la France serait plus faible que celle des plants importés.*
- *Les jeunes plants importés sont protégés par des COV, il faut donc payer des royalties.*

- Les importations sont sous-estimées car en partie déclarées sous une autre nomenclature.

L'importation de boutures non racinées, pour une valeur non négligeable, participe à ce déficit de la balance commerciale. Ces éléments seraient à préciser par une enquête auprès des producteurs de jeunes plants de pépinière.

La France exporte les jeunes plants de pépinière à destination de l'Italie, de l'Espagne puis des Pays Bas. Les jeunes plants importés viennent en majorité des Pays-Bas.

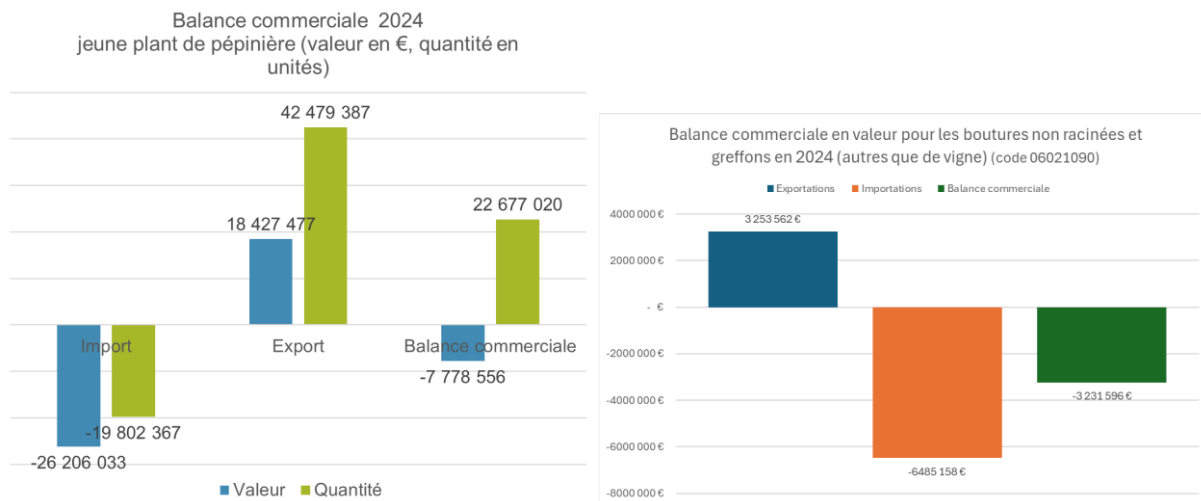


Figure n°31 : balance commerciale française pour les échanges de jeunes plants et de boutures (source : Douanes)

### 3.2.2. Stratégie d'approvisionnement en jeunes plants des producteurs français

L'approvisionnement en jeunes plants est une question stratégique pour les entreprises de productions horticoles et de pépinière. Cet intrant, qui se place au début de la chaîne de création de valeur de la filière, est déterminant pour la définition des itinéraires de culture, la qualité des végétaux produits, l'organisation du travail dans les entreprises et la maîtrise des coûts de production. Quelles sont les stratégies d'approvisionnement en jeunes plants des producteurs ? Voici un état des lieux suite à une enquête menée en juin 2025 par les stations d'expérimentation du CATE (29), du CDHRC (45), de Planète Légumes Fleurs et Plantes (88) et l'institut ASTREDHOR dans le cadre du projet Racin'Air.

#### Une enquête dédiée aux horticulteurs et pépiniéristes

En juin 2025, ces quatre structures de recherche appliquée ont mené une enquête sur les pratiques et difficultés des producteurs en matière d'approvisionnement et de multiplication de jeunes plants. L'objectif était de faire un état des lieux de ces pratiques. Cette enquête était dédiée aux éleveurs de végétaux et non aux multiplicateurs. La part des achats de jeunes plants en externe par rapport à la multiplication en interne a pu être identifiée, de même que celle des achats en France ou à l'étranger. Il s'agissait aussi de cerner les besoins des horticulteurs et des pépiniéristes afin de proposer des innovations mieux intégrées. 60 réponses ont pu être analysées, avec autant de pépiniéristes que d'horticulteurs, pour 599 entreprises questionnées. Ces producteurs sont originaires de 10 régions différentes.

#### L'approvisionnement en jeunes plants : la préférence des pépiniéristes va au « made in France »

Toutes les entreprises interrogées ont recours à l'achat de jeunes plants (boutures non racinées, alvéoles, godets, préconteneurs, racines nues), avec en moyenne 8 à 9 fournisseurs différents. C'est parmi les pépiniéristes qu'on trouve une grande variabilité des stratégies vis-à-vis de ces fournisseurs, certains pouvant s'approvisionner auprès de 20 à 30 fournisseurs différents. On observe globalement que les entreprises de plus grande taille ont recours à un nombre de fournisseurs plus important du fait de l'étendue des gammes produites et des quantités nécessaires.

- (1) Widehem C. , Cheminat G., Doyen J. Plottu B.. 2009. Végétaux de pépinière : du déficit du commerce extérieur français au défaut d'innovation. PHM Revue Horticole juin 2009 n° 514 pages 23-28.

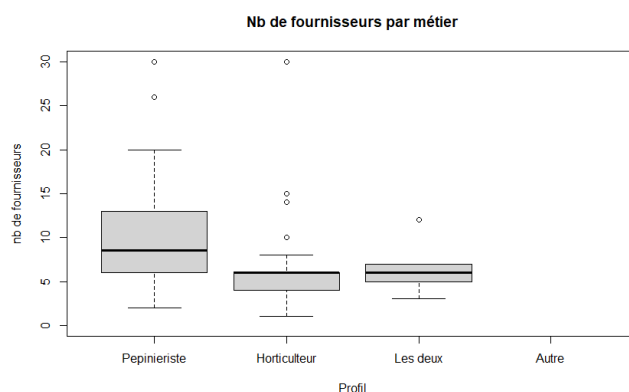


Figure n°32

La préférence est-elle donnée aux fournisseurs de jeunes plants français ? 80 % des pépiniéristes donnent la préférence au « made in France » lorsqu'ils achètent des jeunes plants. Au contraire pour les horticulteurs, pour qui ça ne concerne seulement qu'un tiers d'entre eux (32 %). Cette situation est à mettre en lien avec le nombre très faible de spécialistes de jeunes plants horticoles français et donc, l'obligation pour les producteurs de se tourner vers les fournisseurs étrangers.

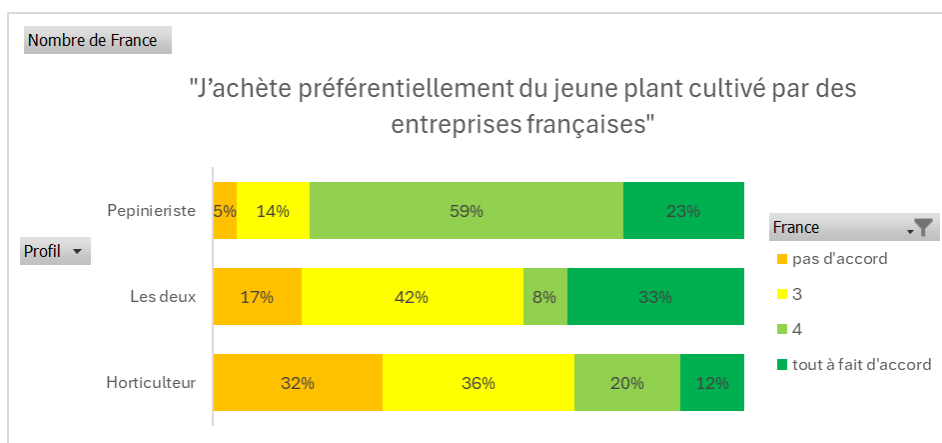


Figure n°33

En ce qui concerne le type de jeunes plants, l'achat de jeunes plants en alvéoles est le plus fréquemment cité par les entreprises devant les racines nues et les godets. Les achats de boutures non racinées ou de pré-conteneurs sont moins souvent cités. Toutefois, ceci ne présage pas des quantités commercialisées par type de jeunes plants.

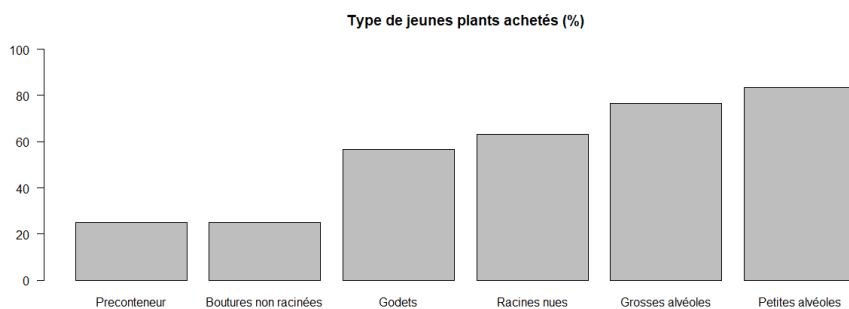


Figure n°34

Malgré tout, pour les pépiniéristes, les types de jeunes plants utilisés sont nettement plus diversifiés que pour les horticulteurs qui se fournissent de façon privilégiée avec des jeunes plants en alvéoles.

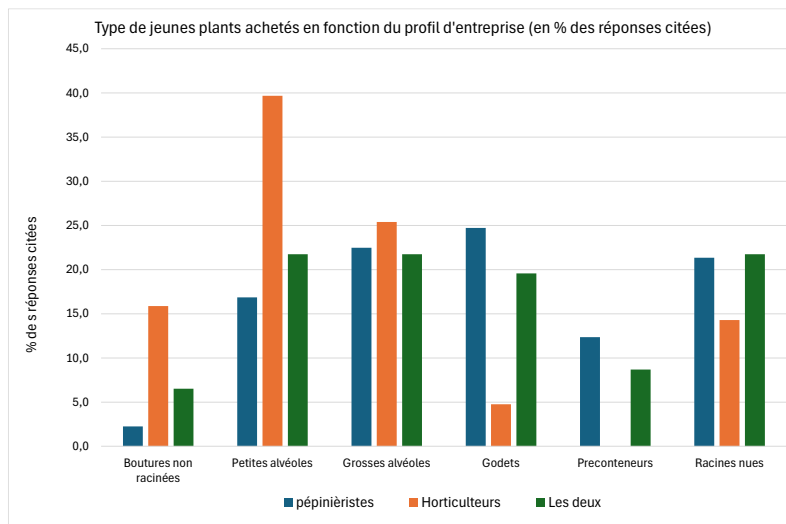


Figure n°35

**Difficultés en matière d’approvisionnement : des soucis de disponibilité des espèces pour les pépiniéristes, et de maîtrise des coûts pour les horticulteurs.**

Les producteurs ont été interrogés sur leurs difficultés d’approvisionnement en jeunes plants. Chez les horticulteurs, les prix trop élevés sont cités en premier. Ce constat est la résultante de la dépendance aux fournisseurs étrangers qui fixent leurs règles en l’absence de concurrence. Cette préoccupation se traduit directement par une motivation supérieure à réaliser de la multiplication en interne : la maîtrise des coûts semble le plus important. Pour les horticulteurs, les difficultés concernant la qualité sont les plus rares, notamment du fait de jeunes plants très standardisés.

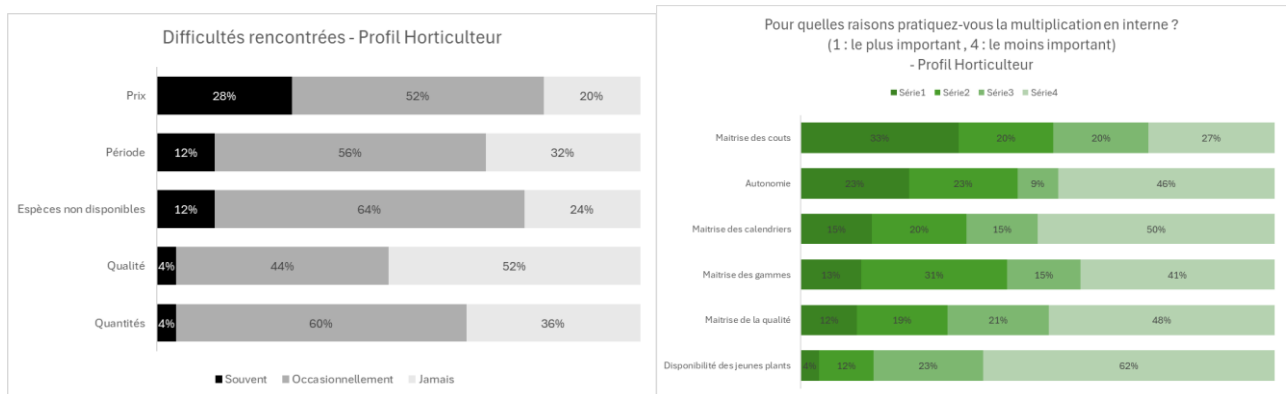


Figure n°36

Du côté des pépiniéristes, les espèces non disponibles et les quantités non disponibles sont les difficultés rencontrées le plus souvent. Des préoccupations qui se traduisent par le recours à un nombre plus élevé de fournisseurs différents. La recherche d’autonomie et la maîtrise des gammes font partie des motivations les plus importantes pour ces derniers pour pratiquer la multiplication en interne.

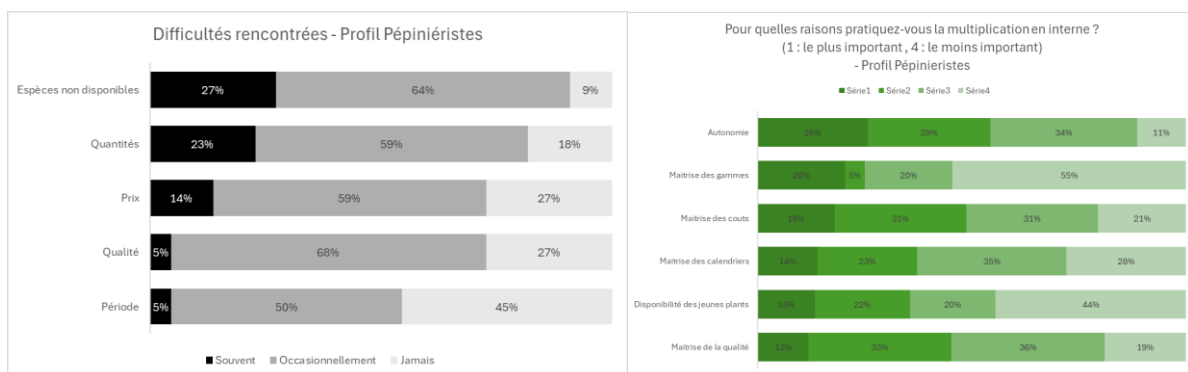


Figure n°37

### La multiplication en interne : une recherche d'autonomie

Bouturage, greffage, semis, division... les trois-quarts des répondants ont recours à la multiplication en interne, Elle est pratiquée aussi bien par les pépiniéristes que les horticulteurs et ce quelle que soit la taille des entreprises. En moyenne 30 % des plantes sont multipliées en interne, mais ce ratio est très variable d'une entreprise à l'autre. Il est beaucoup plus variable pour les pépiniéristes que pour les horticulteurs et les entreprises de plus grande taille multiplient plus en interne.

La multiplication en interne est réalisée d'abord sur les variétés faciles à bouturer (64 %), puis les spécialités (51 %) aussi bien que les espèces non disponibles chez les multiplicateurs (51 %), et dont il faut sécuriser les approvisionnements. Elle concerne peu les variétés difficiles (13 %) ou nécessitant un itinéraire particulier. Les plants potagers, vivaces et aromatiques ont été cités le plus fréquemment, ainsi que de nombreuses espèces en pépinière.

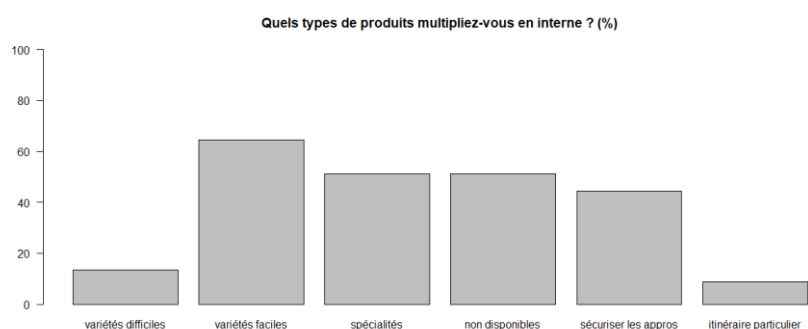


Figure n°38

Les horticulteurs et les plus grosses entreprises se jugent globalement mieux armés que la moyenne pour pratiquer cette multiplication en interne, aussi bien en termes de savoir-faire, de temps disponible, que d'équipements. La culture et la conservation des pieds mères est tout de même un problème pour 70 % des horticulteurs (contre 56 % en pépi). Plus de 80 % des horticulteurs sont convaincus que produire son jeune plant est plus rentable que de l'acheter, contre seulement la moitié des pépiniéristes.

Les techniques de multiplication les plus couramment utilisées par les entreprises sont le bouturage et le semis. Le semis est plus fréquent chez les horticulteurs mais ce n'est pas exclusif. Il est également présent chez les pépiniéristes.

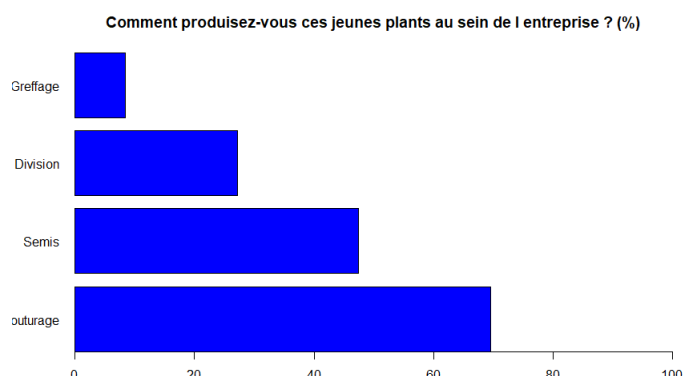


Figure n°39

Différents procédés sont utilisés par les entreprises pour le bouturage en interne, sous abri chauffé ou non chauffé, à l'étouffée ou avec mist ou fog, à l'automne et en hiver ou toute l'année et cela dans des proportions

assez comparables. Le coût de l'énergie et l'optimisation du climat lors de la multiplication constituent des préoccupations fortes.

A l'avenir, la moitié des répondants (48 %) envisage une augmentation de la multiplication en interne, l'autre moitié un maintien à l'identique (46 %). Très peu comptent diminuer cette activité.

Comment va évoluer l'activité de multiplication en interne (%)

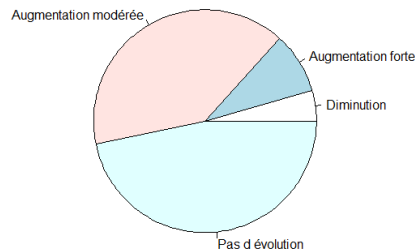


Figure n°40

### Des besoins d'acquisition de références sur la multiplication relativement larges !

Lors de cette enquête réalisée auprès des éleveurs de végétaux, des questions ont été posées sur les besoins d'acquisition de références et de connaissances dans le domaine de la multiplication des végétaux. Les réponses sont très variées, souvent assez pointues, mais révèlent un besoin d'acquisition de références assez large qui explore, lorsqu'on les synthétise, tous les champs de connaissances associés à la multiplication. Elles sont évoquées soit sous forme d'objectifs à atteindre, soit sous forme de techniques à améliorer.

Les objectifs assignés sont notamment d'améliorer un certain nombre de paramètres comme la qualité et la vitesse d'enracinement, la ramification des jeunes plants, l'aptitude à la reprise de façon à maîtriser ou diminuer la durée des cultures et assurer leur homogénéité. Une meilleure maîtrise de l'état sanitaire est demandée. L'intégration des process dans le cadre de la mécanisation fait également partie des enjeux à prendre en compte comme la diminution des impacts environnementaux (énergie, eau, plastiques, éléments fertilisants, produits phytosanitaires). Si des réponses plus précises en fonction des exigences des espèces sont recherchées, des améliorations sont nécessaires pour toutes les grandes gammes de végétaux (arbres, fruitiers, vivaces) et pas seulement pour les arbustes et les annuelles. En pépinière, le report des ventes de végétaux finis de l'automne au printemps bouleverse les calendriers de culture et l'organisation des entreprises. Ce facteur nécessite de repenser les calendriers de multiplication.

Les demandes concernant les techniques à améliorer ou les connaissances à acquérir sont également nombreuses. Il est possible de citer en exemples les thématiques les plus souvent évoquées par les répondants : gestion des pieds mères, qualité des boutures, type de boutures et degré de lignification, physiologie de l'enracinement, types de mottes et de contenants, jeunes plants en multi-boutures, hormones d'enracinement, gestion du climat et maîtrise des coûts énergétiques, bouturage sans chauffage, mécanisation, calendrier de multiplication, irrigation et fertilisation des jeunes plants, régulation de leur croissance, biostimulants, protection contre les bioagresseurs et maîtrise sanitaire, nouvelles techniques de multiplication (aéroponie, éclairage LED, culture in vitro)...

Ces besoins d'acquisition de références techniques peuvent être regroupés en 3 thèmes qui s'inscrivent dans un triptyque tel qu'il est présenté dans la figure suivante. Cette présentation laisse penser qu'il est nécessaire de réfléchir à ces questions en termes de systèmes de multiplication pour lesquels il est souvent difficile d'isoler un des facteurs de production sans s'inquiéter des autres. L'objectif opérationnel de la phase de multiplication étant d'aboutir à une qualité (ou un potentiel de qualité) de jeunes plants rendant possible son intégration dans un itinéraire global de culture permettant à l'entreprise de répondre à ces différents enjeux (qualité finale des végétaux à commercialiser, maîtrise des coûts de production, planning pour la commercialisation, contraintes d'organisation, maîtrise des impacts environnementaux...). Comme les entreprises de production évoluent dans

des contextes très concurrentiels, la fourniture de jeunes plants doit aussi rendre possible leur capacité d'évoluer en adaptant aux besoins les itinéraires de cultures.

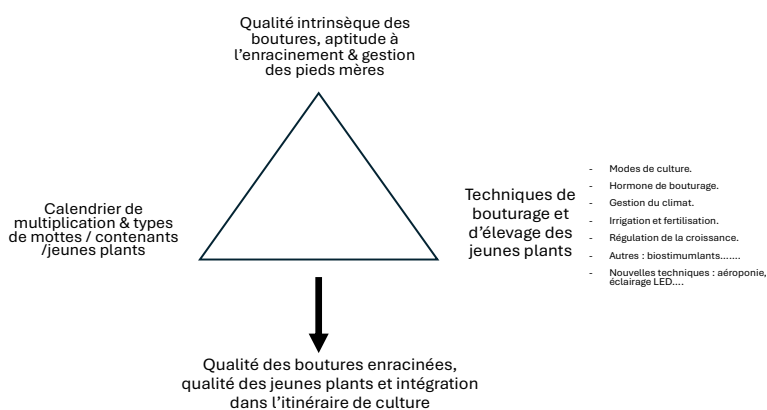


Figure n°41 : besoins d'acquisition de références techniques dans le domaine de la multiplication des végétaux.

Par ailleurs, de nombreux producteurs évoquent également la nécessité d'adapter les gammes de végétaux produits aux modifications climatiques (adaptation à la sécheresse, à la chaleur mais aussi aux conditions hivernales froides et humides), réclament des variétés plus tolérantes aux bioagresseurs et plus compactes. Même si cet aspect de gamme n'est pas purement une question de multiplication, il est important de le souligner au regard de la fréquence des réponses.

### Conclusion sur la stratégie d'approvisionnement en jeunes plants des producteurs français :

A la lumière de l'importance des entreprises spécialisées en multiplication, secteur qui subit une lente érosion du nombre d'entreprises, pour l'ensemble de la filière ornementale, mais aussi du pourcentage d'entreprises réalisant de la multiplication en interne qui est nettement plus élevé qu'attendu (70 % des entreprises) pour une proportion de jeunes plants produits en interne non négligeable (30 % en moyenne), il est nécessaire de se poser la question si les acteurs de la recherche appliquée ne devraient pas réinvestir plus fortement les questions concernant la multiplication des plantes ornementales dans leur activité. Certains acteurs ont commencé à le faire mais ce secteur de l'expérimentation et de la recherche appliquée reste relativement délaissé depuis plusieurs décennies. Cela pose la question de l'allocation des moyens de la recherche.

L'exemple des horticulteurs devenus fortement dépendants des multiplicateurs étrangers, avec des conséquences sur les prix des jeunes plants et sur leur accès, faisant craindre un risque de perte de compétitivité, doit être médité par l'ensemble de la filière.

### 3.2.3. Acceptabilité de l'aéroponie pour les cibles d'utilisateurs potentielles

Les freins et potentialité du bouturage par aéroponie sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Force	Faiblesse	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Améliore la qualité de l'enracinement.</li> <li>- Diminue la sensibilité aux maladies et l'IFT.</li> <li>- Diminue les impacts environnementaux.</li> <li>- Facilite la surveillance de l'enracinement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investissement</li> <li>- Coût de production sensible à la réussite du bouturage.</li> <li>- Coût de production plus élevé de 10 à 15%</li> <li>- Temps de travaux pour bouturage : - 5%</li> <li>- Temps de travaux pour empotage augmenté : +60%</li> <li>- Application d'auxine différente.</li> <li>- Surveillance si peu d'automatisme.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Economie d'échelle (surface de bouturage / pompage &amp; contrôle commande)</li> <li>→ Augmenter la densité.</li> <li>→ Faire au moins 2 à 3 cycles de production /an</li> </ul>
Opportunités	Risques /menaces	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Améliorer taux de réussite.</li> <li>- Facilite gestion des petits lots et des innovations végétales.</li> <li>- Facilite la conduite hydrique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prix de l'électricité.</li> <li>- Risque à l'empotage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Adaptation de la conduite à l'empotage.</li> </ul>

Tableau n° 16

Les impacts sur les coûts sont à modérer pour les espèces où le bouturage par aéroponie permet de disposer de jeunes plants, même si le taux de réussite n'est pas maximum, alors que les pratiques de référence ne permettent pas d'avoir une disponibilité satisfaisante. Ce sont les écarts de réussite entre les 2 techniques de bouturage qui permettent d'évaluer l'intérêt de la technique et pas seulement le % de réussite d'une technique.

Il ressort du travail réalisé dans ce projet qu'une problématique essentielle est qu'il reste nécessaire de mettre au point le bouturage d'une espèce donnée pour cette nouvelle technique de bouturage comme il est nécessaire de le faire pour le bouturage de référence sur substrat. Toutefois, ce travail semble plus facile à réaliser en aéroponie qu'avec le bouturage sur substrat car les risques de mortalité des boutures à cause de maladie des parties aériennes et d'excès d'eau sont fortement diminués (lorsque le fonctionnement du dispositif d'aéroponie est maîtrisé).

Cette mise au point du bouturage d'un taxon passe par la résolution des questions suivantes :

- Choix des pieds mères.
- Période de bouturage.
- Type de bouture.
- Degré de lignification.
- Utilisation d'hormone de bouturage.

Des échanges avec les multiplicateurs et les producteurs éleveurs, il ressort que la technique du bouturage par aéroponie pourrait être intéressante à utiliser pour un certain nombre de conditions de production ou de cibles :

- Pour les taxons récalcitrants au bouturage et qui dont la multiplication par des techniques conventionnelles est abandonnés car ils sont trop coûteux à multiplier malgré des débouchés qui sont certains.
- Pour des végétaux multipliés par greffage car ils répondent mal au bouturage (dans ce cas, ce n'est pas la nécessaire adaptation d'un porte greffe aux conditions pédoclimatiques qui justifie le greffage). Or, le greffage reste une technique très coûteuse de multiplication.
- Faciliter la gestion chez les multiplicateurs d'une gamme large d'espèces très diversifiées mais multipliées en petite quantité pour chacune d'entre elle. Or, ce contexte est une spécificité du secteur de la multiplication française qui a des répercussions sur les coûts de gestion.
- La multiplication des nouveautés multipliées en petite quantité au départ.
- Pour les producteurs de plantes en pots – plantes à massifs : possibilité de faire du complément de production lors qu'il devient difficile de répondre aux exigences des multiplicateurs étranger pour l'achat des jeunes plants (planning de commande / quantité minimum d'achat / date de livraison / gammes de variétés).

## **VI. CONCLUSION**

Le premier objectif de ce projet était de mettre au point un dispositif de bouturage de végétaux par aéroponie qui permette de réaliser une production de boutures à grande échelle en tenant compte de l'ensemble des contraintes qui se pose aux multiplicateurs. Après une phase de co-conception avec des producteurs et des multiplicateurs, plusieurs prototypes ont été construits à cet effet.

Au niveau technique et malgré un certain nombre de difficulté qui sont apparues lors de la mise en œuvre de ces prototypes, cet objectif est atteint.

Ces prototypes sont constitués d'une table de bouturage sur laquelle un procédé d'insertion et de maintien des boutures vient séparer un compartiment racinaire dans lequel une brumisation est opérée et un compartiment pour les parties aériennes des boutures protégé par un capot de confinement. Un dispositif à étage pour limiter la surface au sol est également proposé.

Un enjeu important était de trouver un ou plusieurs procédés d'insertion et de maintien des boutures permettant de réaliser le bouturage et la récolte des boutures enracinées avec des temps de travaux acceptables qui n'augmentent pas trop le coût de production. Les procédés conçus répondent en grande partie à cet objectif. Il peut être de plus facilement construit en interne avec des matériaux facilement accessibles. Par ailleurs, ce procédé permet également de bien cloisonner le compartiment racinaire dans lequel la brumisation est réalisée. L'état sanitaire des parties aériennes des boutures n'est alors pas perturbé comme c'est le cas lorsque de l'humidité traverse cette cloison.

Les modules de stockage, de traitement de l'eau (chauffage, oxygénation, régulation du pH et de l'EC) et de pompage pour la brumisation au niveau des racines (ainsi que sa programmation) ont montré un bon fonctionnement et se révèle pertinent par rapport aux objectifs de production. Ces modules sont adaptables pour un changement d'échelle de la production. Dans ce projet, ils ont été connectés à une surface de bouturage d'environ 4 à 5 m<sup>2</sup> mais cette surface peut être largement augmenté avec le même module de traitement de l'eau. Au cours des essais, il est apparu qu'il sera nécessaire de désinfecter régulièrement l'eau stockée pour limiter les développements bactériens apparus lors du bouturage de certaines espèces (*Griselinia littoralis*). La consommation d'électricité pour le fonctionnement du procédé et notamment le chauffage de l'eau stocké s'est révélée non négligeable. L'isolation du dispositif est nécessaire pour limiter les déperditions d'énergie. Mais, l'augmentation de la surface de la table de bouturage permettra des économies d'échelle très substantielle.

La mise au point du prototype pour le changement d'échelle de production a souligné l'importance à accorder au fonctionnement hydrique des boutures lors de la réalisation du bouturage par aéroponie. C'est une différence importante par rapport aux techniques classiques de bouturages en substrat où les boutures sont maintenues dans un environnement très humide. Avec le bouturage par aéroponie, la transpiration des boutures doit être prise en compte et il doit exister un équilibre entre la transpiration au niveau des parties aériennes et l'absorption d'eau par les sections de tiges des boutures dans le compartiment racinaire (ou par les racines lorsqu'elles sont apparues). Les fonctionnements du procédé de brumisation et du capot de confinement doivent constituer un système cohérent pour assurer le statut hydrique des boutures en évitant la condensation sur le feuillage qui peut poser des problèmes sanitaires non négligeables et les déperditions d'énergie du système.

Les prototypes proposés dans ce projet sont opérationnels pour du bouturage de plantes ornementales à grande échelle. Pour les espèces difficiles à bouturer voire récalcitrantes, il reste nécessaire de mettre au point les conditions de bouturage de ces espèces avec cette nouvelle technique comme il est nécessaire de le faire pour le bouturage de référence sur substrat. Toutefois, ce travail semble plus facile à réaliser en aéroponie qu'avec le bouturage sur substrat car les risques de mortalité des boutures à cause de maladie des parties aériennes et d'excès d'eau sont fortement diminués (lorsque le fonctionnement du dispositif d'aéroponie est maîtrisé).

Cette mise au point du bouturage d'un taxon passe par la résolution des questions suivantes :

- Choix des pieds mères.
- Période de bouturage.
- Type de bouture.
- Degré de lignification.
- Utilisation d'hormone de bouturage.

Toutefois, pour un certain nombre d'espèces difficiles à bouturer ou récalcitrantes au bouturage, il est nécessaire de constater que l'amélioration de l'oxygénation à la base des boutures n'est pas la seule démarche à mettre en œuvre pour améliorer la réussite du bouturage. En dehors de l'optimisation des conditions de bouturage, l'amélioration de la qualité intrinsèque des boutures, c'est-à-dire de leur aptitude interne à l'enracinement, reste un axe de travail important à mettre en œuvre. Cela passe par un travail sur les pieds mères.

Au cours de ce projet, la diffusion de matériel végétal produit par les prototypes étudiés et le transfert du procédé à des producteurs a été ralenti par le temps nécessaire à la mise au point des prototypes. Il n'a pas été aussi important que prévue initialement. La technique a par contre commencé à être appréhendé par la filière PPAM.

Une analyse économique du procédé a été réalisé pour préciser les coûts des charges opérationnelles et de main d'œuvre que cette nouvelle technique induit. Pour cette analyse, les charges de main d'œuvre et opérationnelles retenues ont été celles qui vont du prélèvement de la bouture sur les pieds mères, au repiquage dans le dispositif, à la récolte des boutures enracinées puis à l'empotage des boutures enracinées en godet, l'énergie, le coût du godet, du substrat fertilisé et autres intrants, et cela, en tenant compte de toutes les pertes au cours du processus.

Dans tous les cas de figure, le taux de réussite du bouturage et à l'empotage est déterminant et influence fortement le montant des charges opérationnelles et de main d'œuvre /bouture valorisée en godets. Mais, globalement, le montant des charges opérationnelles et de main d'oeuvre /bouture valorisée en godets se situe entre 0,50 et 0,60 € / bouture lorsque le taux de perte lors du bouturage et après le repotage en godets reste acceptable, c'est-à-dire inférieur à 20 %. A ce niveau de perte, l'essentiel des charges est constitué par la main d'œuvre (78 %).

Si les coûts engendrés par l'utilisation d'hormones de bouturage et de l'énergie pour le chauffage de la solution brumisée en période hivernale peuvent être amortis de façon plus que proportionnelle par un plus grand nombre de

boutures produites (du fait d'une diminution des pertes), le coût résultant par unité produite se trouvera diminué. Cette caractéristique est très dépendante des taxons étudiés.

Lorsque des comparaisons ont été possibles entre bouturage en mottes et bouturage en aéroponie, il a été possible de constater que les charges opérationnelles /bouture valorisable en godets sont augmentées d'environ 10 % en aéroponie par rapport au bouturage en mottes lorsqu'une amélioration du résultat du bouturage est observée.

Il apparaît que le montant de l'investissement associé à la mise en œuvre du bouturage par aéroponie n'est pas un facteur à négliger mais il est à relativiser car il est possible de bénéficier d'une forte économie d'échelle puisque le module de traitement de l'eau et de contrôle peut servir pour une surface de table de bouturage 4 à 6 fois plus grande que ce qui a été mis en œuvre dans ce projet. De plus, l'augmentation du nombre de séries de boutures réalisées chaque année, est un moyen de limiter l'impact de cet investissement sur le coût de production. L'analyse montre qu'il est également important de chercher à maximiser la densité de boutures sur la table de bouturage (jusqu'à un maximum technique acceptable) afin de limiter l'impact de l'investissement sur le coût de production.

Ce projet de recherche appliquée a donc permis de répondre aux questions posées initialement :

- Des prototypes permettant le bouturage à grande échelle ont été élaborés et sont opérationnels.
- L'ergonomie des dispositifs a été fortement améliorée pour maîtriser les temps de travaux associés au bouturage.
- Des points de vigilance ont été décrits et des adaptations de la conduite proposées pour la mise en œuvre de cette technique. Cette description permettra de limiter les risques techniques pour les utilisateurs potentiels.
- Les aspects économiques ont commencé à être établis et les déterminants du coût de production ont été identifiés.
- L'étude des coûts d'investissements a permis de montrer un certain nombre de pistes pour limiter les impacts des frais amortissement /bouture (économie d'échelle dans la conception des dispositifs d'aéroponie, importance de la densité de bouture /m<sup>2</sup> de la table de bouturage et du degré d'utilisation à travers le nombre de séries de boutures faites par an).

En revanche, les résultats de ce projet montrent que la réussite du bouturage pour une espèce ornementale donnée reste conditionnée à la mise au point des conditions idéales de bouturage pour cette espèce. Une démarche est proposée pour faciliter ce travail à travers l'étude de facteurs jugés prioritaires : l'époque de bouturage, le type de bouture, le stade des boutures et l'utilisation d'hormone de bouturage. La qualité intrinsèque des boutures qui est un facteur associé aux pieds mères restent une donnée essentielle pour la réussite du bouturage.



