



Guide de culture de plantes et champignons pour dépolluer les sols



UCLouvain



Etterbeek



bruxelles
environnement
.brussels

Édito

Ce guide vise à fournir un maximum d'informations nécessaires à la culture de plantes et de champignons mycorhiziens en vue de leur utilisation dans la gestion de la pollution des sols. Il est le résultat de trois ans d'expérimentations du projet Citoyens pour la Dépollution des Sols (CiDéSol) et du savoir et savoir-faire accumulé pendant de nombreuses années par les laboratoires d'écologie végétale et biogéochimie de l'ULB et de mycologie de l'UCLouvain.

Cette première version du guide a été mise à l'épreuve des co-chercheurs expérimentateurs de CiDéSol afin de restituer au mieux leurs connaissances et pratiques. Il est probable (et souhaitable) que l'état des connaissances présentées ici continue à évoluer et que des adaptations aux grandes lignes données ici soient nécessaires selon les différents contextes où elles seront appliquées.

Ce guide est destiné à un large public qui s'intéresse à la phytoremédiation des sols et qui voudrait mettre en œuvre ces techniques de dépollution.

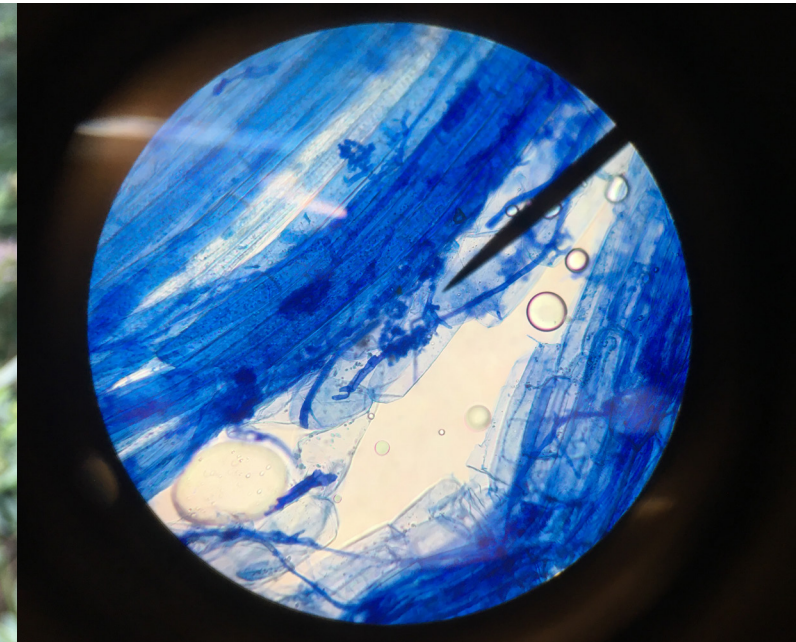


Table de matières

I. Les polluants	4	III. Comment cultiver <i>Noccea caerulescens</i>	23
Etat de la pollution à Bruxelles	4	III.1. Généralités	23
Législation	5	1. Répondre aux besoins de la plante	23
Le cadre de CiDéSol	5	2. Gérer la compétition	23
I.1. Les éléments trace métalliques	6	3. Installer des protections contre les ravageurs	26
Le cadmium	6	4. Les techniques de culture : semis direct et repiquage	29
Propriétés physico-chimiques	6	III.2. Les itinéraires de culture.....	33
Source de pollutions au cadmium	6	1. Itinéraire de culture pour la dépollution de sites contaminés par des métaux	33
Biodisponibilité	6	2. Itinéraire de culture pour la production de semences	37
Les valeurs seuils	7	3. Le suivi des cultures :	38
I.2. Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques	8	4. La récolte des graines	39
Propriétés physico-chimiques des HAPs	8	5. La suite des cultures	39
Source des HAPs	8	IV. Comment cultiver les champignons mycorhiziens à arbuscules avec de la luzerne ...	40
Etat des sols pollués en HAP en région bruxelloise	8	IV. 1. Généralités	40
Les valeurs seuils	11	1. Conditions de culture / climat	40
II. Phytoremédiation	12	2. Emplacement des parcelles	40
II.1. Phytoextraction	13	3. Préparation du sol	40
Un cycle de vie en un ou deux ans	14	4. Semis et inoculation par les CMA	40
Son milieu de vie	14	5. Besoin en eau et arrosage	41
Une plante qui accumule les métaux	14	6. Sol et apport de nutriments	41
Plusieurs variétés : Luxembourgeoise et Ganges	14	7. Gérer la compétition	41
II.2. Phytoremédiation assistée par CMA	16	IV. 2 Itinéraires de culture	41
Les champignons mycorhiziens à arbuscules	16	1. Produire son inoculum mycorhizien maison	41
Cycle de vie des champignons mycorhiziens à arbuscules	16	2. Utiliser son inoculum pour inoculer sa parcelle à dépolluer	43
Bénéfices de la symbiose mycorhizienne pour la plante	18	3. Traiter les déchets issus de la culture pour dépolluer les sols contaminés	
Quelles plantes mycotrophes choisir pour dépolluer les sols pollués par les HAPs ?	22	par les HAPs	43
		4. Culture de luzerne et inoculation aux CMA	44
		V. Le mot de la fin	44

I. Les polluants

Nous décrivons ici brièvement l'état de la pollution à Bruxelles, pour une analyse plus complète le lecteur peut se référer au Rapport scientifique #1 de CiDéSol¹ ou à l'étude '(Dé)pollution des sols en région bruxelloise : état des lieux et propositions'².

État de la pollution à Bruxelles

Les sols Bruxellois présentent une diversité de types de polluants et de concentrations selon les sites. Quatre grandes familles de polluants peuvent être décrites :

- Les éléments trace métalliques (ETM – anciennement appelés métaux lourds, voir p. 6)
- Les polluants organiques (constitués de chaînes de carbone, voir p.8)
- Les solvants chlorés
- Les micro-plastiques (pas encore de données disponibles pour Bruxelles pour ce type de polluants)

La distribution de ces polluants n'est pas homogène dans les sols de la capitale. Selon l'affectation des sols les types de polluants et leur concentration peut varier fortement entre les parcelles.

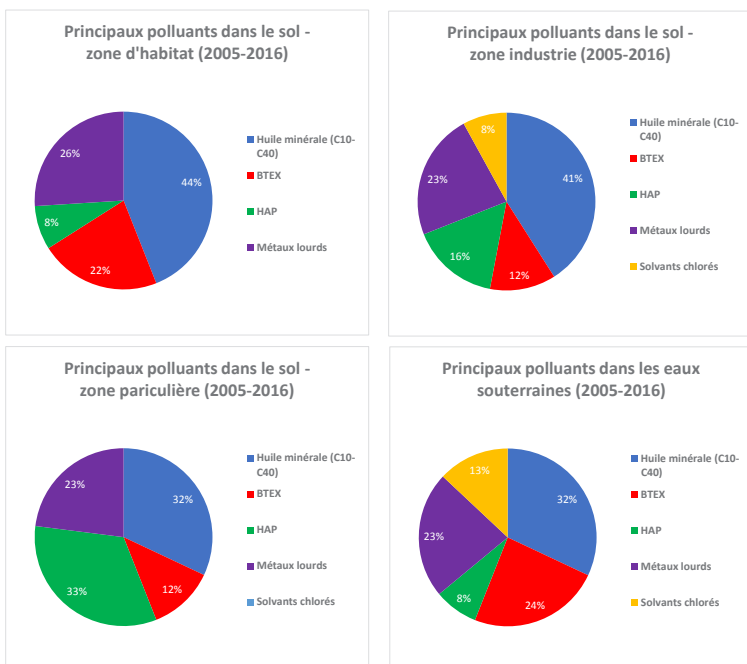


Figure 1. Distribution de 5 types majeurs de polluants (huiles minérales, BTEX, HAP, ETM, solvants chlorés) selon 4 types de zones bruxelloises (zone d'habitat, zone industrielle, zone particulière, eaux souterraines). Source: [Bruxelles Environnement 2016](#).

Ainsi, les zones d'habitat présentent une plus grande proportion d'huiles minérales, alors que les zones particulières (espaces verts, zones naturelles) montrent une plus grande proportion de HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques- figure 1).

Bruxelles Environnement, l'administration en charge de la gestion des sols bruxellois, a mis en place une carte interactive décrivant l'état du sol (Figure 2). Cet inventaire se base sur des analyses chimiques de sol (pour les parcelles appartenant aux catégories 1 à 4) et sur l'analyse des activités déclarées (catégories 0 et 0+) pour chacune des ~220.000 parcelles de la région.

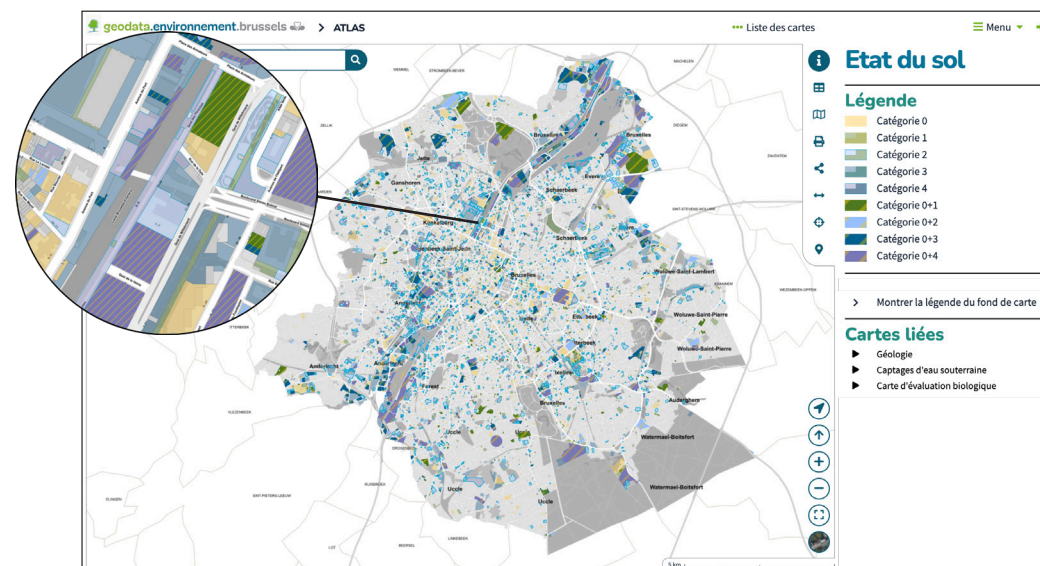


Figure 2. Carte de l'état du sol produite par Bruxelles Environnement. Les parcelles de la Région sont distribuées en 5 catégories :
Catégorie 0 = potentiellement pollué
Catégorie 1 = non pollué
Catégorie 2 = légèrement pollué sans risque
Catégorie 3 = pollué sans risque
Catégorie 4 = pollué en cours d'étude, de traitement ou de surveillance.
Source : Bruxelles Environnement, carte consultée le 06.07.2023

¹ Rapport scientifique #1 de CiDéSol

² (Dé)pollution des sols en région bruxelloise : état des lieux et propositions

Pour les parcelles qui se trouvent dans les catégories 1 à 4, le classement dans l'une ou l'autre catégorie dépend du dépassement de différentes normes. Il existe deux types de normes définies dans l'arrêté du 29 mars 2018, les normes d'assainissement (NA) et les normes d'intervention (NI). Si la concentration en polluants se trouve sous la NA, le règlement considère qu'il n'y a pas de risque pour la santé ou l'environnement. Si la concentration en polluants se trouve entre la NA et la NI cela signifie que le terrain est pollué mais que cette pollution ne représente pas un risque grave. Si la concentration est au-dessus du NI, il faut réaliser une étude sol approfondie (par un expert sol agréé) qui peut mener à une dépollution (par un assainisseur agréé). Ces normes dépendent de la zone à laquelle la parcelle dont proviennent les échantillons est affectée selon le PRAS (Plan Régional d'Affectation du Sol). Les parcelles sont définies comme suit :

- Zone particulière : zones vertes, zones vertes à haute valeur biologique, zones forestières, zones agricoles.
- Zone d'habitat : zones de servitudes au pourtour des bois et forêts, zones de parcs, zones de cimetières, zones d'habitation à prédominance résidentielle, zone d'habitation, zones mixtes, zones administratives, zones d'équipements d'intérêt collectif ou de service public, zones de sport ou de loisirs en plein air.
- Zone industrielle : zones d'industries urbaines, zones d'activités portuaires et de transport, zones de chemin de fer.

Il faut noter que les parcelles qui n'ont pas déclaré d'activités à risque ne sont pas reprises par l'inventaire (parcelles en gris clair dans la carte). Il s'agit de la plus grande partie des parcelles bruxelloises (81.63%- SPRB, 2014), qui passent donc sous le radar.

³ [3 SEPTEMBRE 2020. — Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale modifiant l'arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 17 décembre 2009 fixant la liste des activités à risque tel que modifié par l'arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 16 juillet 2015](#)

⁴ [Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale fixant la liste des activités à risque : version consolidée pour information \(seuls les textes tels que publiés au Moniteur belge ont valeur légale\)](#)

⁵ [29 MARS 2018. — Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale déterminant les normes d'intervention et les normes d'assainissement](#)

Afin de mitiger ce manque d'information, Bruxelles Environnement procède actuellement à une grande campagne d'échantillonnage sur toute la région, dans le cadre de la stratégie Good Soil, mais la quantité de travail reste colossale.

Législation

Le cadre légal A Bruxelles, à l'heure actuelle, la gestion des sols est cadrée uniquement à travers le prisme de la pollution. L'Ordonnance du 23 juin 2017 modifiant certaines dispositions de l'ordonnance du 5 mars 2009 relative à la gestion et à l'assainissement des sols pollués, est le texte de référence dans ce domaine. Cette ordonnance est complétée par plusieurs arrêtés définissant : la liste des activités à risque³ (dont la dernière liste en vigueur⁴), les normes d'assainissement et d'intervention⁵, le contenu de la reconnaissance de l'état du sol⁶, ou le contenu type des projets d'assainissement⁷ notamment. Ces informations sont détaillées et complétées sur le site de Bruxelles Environnement^{8,9}.

Le cadre de CiDéSol

Dans le cadre des possibilités de traitement par phytoremédiation, notre projet se concentre sur certains éléments trace métalliques (le cadmium, le zinc et le nickel) et certains polluants organiques (les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques ou HAP). En effet, les méthodes que nous avons mis en œuvre sont incapables de prendre en charge les autres types de polluants métalliques, chlorés ou microplastiques.

⁶ [29 MARS 2018. — Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale remplaçant l'arrêté du 8 juillet 2010 fixant le contenu type de la reconnaissance de l'état du sol et de l'étude détaillée et leurs modalités générales d'exécution](#)

⁷ [29 MARS 2018. — Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale fixant le contenu type du projet de gestion du risque, du projet d'assainissement, de la déclaration préalable de traitement de durée limitée, et des modalités d'affichage et de recours pour le traitement de durée limitée](#)

⁸ [Bruxelles Environnement, Quelles sont les législations sol en vigueur ?](#)

⁹ [Bruxelles Environnement, Documents utiles](#)

I.1. Les éléments trace métalliques

Les métaux sont des composants inhérents à la croûte terrestre et se trouvent donc dans tous les sols. A des concentrations faibles, certains métaux sont des nutriments essentiels à la vie (fer, zinc, cuivre, nickel), mais ils peuvent devenir toxiques à des concentrations élevées. D'autres métaux sont toxiques même à faibles doses (cadmium, plomb, mercure, arsenic) et peuvent nuire à la santé humaine ou à l'environnement.

La notion de métaux lourds rassemblait les métaux présentant ce type de toxicité, mais englobait également des éléments métalliques qui ne sont pas lourds, ou d'autres types d'éléments. Pour pallier ce problème, la notion d'élément trace métallique a été adoptée. Les éléments trace métalliques (ETM) sont définis comme des substances toxiques, non biodégradables, qui persistent pendant de longues périodes dans l'environnement, et peuvent s'accumuler dans les chaînes alimentaires. Les ETM incluent à la fois des métaux, tels que le cadmium, le plomb ou le fer ; des métalloïdes, tels que l'arsenic ; et des radionucléides (éléments radioactifs), tels que le radium et le radon.

Les sources de pollution en ETM peuvent être naturelles (concentrations élevées en métaux naturellement présents dans le fond géochimique du sol, accumulation dans les sols en aval suite à l'érosion ou lessivage des sols en amont) ou d'origine humaine (concentrations des métaux suite à l'exploitation minière, les émissions industrielles, les rejets urbains).

Contrairement à d'autres types de polluants, il est impossible de dégrader les ETM. Nous parlons bien ici d'éléments atomiques et non pas des molécules dans lesquelles ils peuvent se trouver : pour détruire un atome de métal il faut une réaction nucléaire qui ne peut donc se faire que dans un réacteur nucléaire ou dans une étoile.

Dans la suite du document nous nous référerons aux ETM sous l'appellation 'métaux' pour fluidifier la lecture.

Le cadmium

Dans le cas de notre recherche nous nous intéressons particulièrement au cadmium car c'est un élément très toxique, mobile, et relativement présent dans les sols bruxellois.

Propriétés physico-chimiques

Le cadmium est un métal blanc argenté ayant des propriétés physiques proches de celles du zinc. Il est malléable, ductile et résiste à la corrosion atmosphérique, ce qui en fait un revêtement de protection pour les métaux ferreux (acier galvanisé, cadmiage et revêtements galvanoplastiques) ; il est insoluble dans l'eau et les bases, l'eau pure est sans action sur le cadmium, même à ébullition.

Source de pollutions au cadmium

Dans les milieux naturels, le cadmium est souvent associé au zinc, au cuivre et au plomb dans les minerais. Il s'associe également au phosphate et est introduit dans les sols entre autres via les engrais phosphatés. En ville différentes sources de cadmium sont possibles : présent dans les plaquettes de freins, le cadmium est libéré dans l'atmosphère à chaque freinage ; présent dans différents émaux, les ateliers de poterie qui se débarrassaient de leurs rejets dans le sol ont apporté leur lot de cadmium dans les sols ; les imprimeries ayant des pratiques similaires ont également contribué à la pollution en cadmium des sols environnants ; autre exemple, le cadmium est utilisé dans les processus de galvanisation des métaux, et se trouve donc souvent à l'air libre soumis aux intempéries.

Biodisponibilité

Le cadmium est présent dans les sols et peut facilement entrer dans les plantes, et donc dans la chaîne alimentaire. Le cadmium est considéré comme cancérigène, mutagène et toxique pour la reproduction, et il peut causer des problèmes de santé chez l'Homme, tels que des atteintes rénales et une fragilité osseuse, surtout en cas d'exposition prolongée par voie orale via l'alimentation et l'eau de boisson. Les principales sources d'exposition de la population générale au cadmium sont l'alimentation et le tabac, pour les fumeurs.

Dans le sol, le cadmium peut se présenter sous une forme biodisponible (absorbable et mobilisable par les plantes et autres organismes vivants) ou sous forme indisponible (il reste immobilisé dans le sol). Le cadmium du sol peut passer d'une forme à l'autre selon les conditions physico-chimiques de son environnement immédiat (pH, température, concentration en cadmium de l'autre forme, interaction avec d'autres composants du sol).

Les valeurs seuils

Les seuils de concentration en cadmium décrivent les valeurs au-delà desquelles on considère que le sol, l'eau ou les légumes sont pollués. Ces seuils sont fixés par la législation bruxelloise¹⁰ pour l'eau et pour le sol selon l'affectation de la parcelle (zone particulière : espaces verts, zones naturelles, sites de production agricole ; zone d'habitat : habitations avec ou sans jardin ; zone industrielle). La description des différentes zones est accessible dans le Plan Régional d'Affectation du Sol (PRAS)¹¹ (Tableau 1).

Tableau 1. Normes d'intervention (a) et d'assainissement (b) des différents ETM dans le sol en Région de Bruxelles Capitale. Source : Arrêté du 29 mars 2018¹⁰.

a)

Classe de sensibilité	Partie fixe du sol (mg/kg matière sèche)			Eau souterraine (µg/l)	Air du sol (Vol. %)
	Zone particulière	Zone d'habitat	Zone industrielle		
METAUX LOURDS ET METALLOÏDES					
Arsenic	58	103	267	20	
Cadmium	2	6	30	5	
Chrome (III)	130	240	880	50	
Cuivre	120	197	500	100	
Mercure	2,9	4,8	11	1	
Plomb	200	560	1250	20	
Nickel	93	95	530	40	
Zinc	333	333	1250	500	

b)

Vaste deel van de aarde (mg/kg droge stof)		Grondwater (µg/l)
Partie fixe du sol (mg/kg matière sèche)		Eau souterraine (µg/l)
METAUX LOURDS ET METALLOÏDES / ZWARE METALEN EN METALLOÏDEN		
Arsenic	Arseen	35
Cadmium	Cadmium	1,2
Chrome (III)	Chroom (III)	91
Cuivre	Koper	72
Mercure	Kwik	1,7
Plomb	Lood	120
Nickel	Nikkel	56
Zinc	Zink	200

Les normes fixant les concentrations en cadmium à ne pas dépasser dans les denrées alimentaires sont fixées par le règlement européen (UE) 2021/1323¹² (Tableau 2).

Tableau 2. Extrait des normes des teneur maximales en cadmium de certains aliments. Source : Règlement (UE) 2021/1323¹².

Denrées alimentaires ⁽¹⁾	Teneur maximale (mg/kg de poids à l'état frais)
3.2 Cadmium	
3.2.1 Fruits ⁽²⁷⁾ et fruits à coque ⁽²⁷⁾	
3.2.1.1 Agrumes, fruits à pépins, fruits à noyau, olives de table, kiwis, bananes, mangues, papayes et ananas	0,020
3.2.1.2 Baies et petits fruits, à l'exclusion des framboises	0,030
3.2.1.3 Framboises	0,040
3.2.1.4 Fruits, à l'exclusion de ceux énumérés aux points 3.2.1.1, 3.2.1.2 et 3.2.1.3	0,050
3.2.1.5 Fruits à coque ^(*)	
3.2.1.5.1 Fruits à coque, à l'exclusion de ceux énumérés au point 3.2.1.5.2	0,20
3.2.1.5.2 Pignons	0,30
3.2.2 Légumes-racines et légumes-tubercules ⁽²⁷⁾	
3.2.2.1 Légumes-racines et légumes-tubercules, à l'exclusion de ceux énumérés aux points 3.2.2.2, 3.2.2.3, 3.2.2.4, 3.2.2.5 et 3.2.2.6. Dans le cas des pommes de terre, la teneur maximale s'applique aux produits pelés.	0,10
3.2.2.2 Radis	0,020
3.2.2.3 Racines et tubercules tropicaux, persil à grosse racine, navets	0,050
3.2.2.4 Betteraves	0,060
3.2.2.5 Céleris-raves	0,15
3.2.2.6 Raiforts, panais, salsifis	0,20
3.2.3 Légumes-bulbes ⁽²⁷⁾	
3.2.3.1 Légumes-bulbes, à l'exclusion des aulx	0,030
3.2.3.2 Aulx	0,050
3.2.4 Légumes-fruits ⁽²⁷⁾	
3.2.4.1 Légumes-fruits, à l'exclusion des aubergines	0,020
3.2.4.2 Aubergines	0,030
3.2.5 Légumes du genre Brassica ⁽²⁷⁾	
3.2.5.1 Légumes du genre Brassica, autres que les choux feuilles	0,040

¹⁰ [29 MARS 2018 — Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale déterminant les normes d'intervention et les normes d'assainissement](#)

¹¹ [Plan Régional d'Affectation du Sol](#)

¹² [Règlement \(UE\) 2021/1323 de la commission du 10 août 2021 modifiant le règlement \(CE\) no 1881/2006 en ce qui concerne les teneurs maximales en cadmium dans certaines denrées alimentaires](#)

1.2. Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (ou HAPs dans la suite du document) sont des polluants organiques persistants dans les sols. Ils sont organiques puisque composés de carbone et d'hydrogène. Ils sont fréquemment rencontrés dans les sols pollués. Dans les zones particulières bruxelloises (comprenant les zones vertes-à haute valeur biologique ou non-, zones de parcs, zones de cimetières, zones forestières, zones de servitudes au pourtour des bois ou forêts, zones agricoles et zones de protection de captages des eaux souterraines), le pourcentage de sols pollués par les HAPs atteint 33%¹³.

Ces polluants sont issus de la fusion d'au moins deux cycles benzéniques¹⁴ présentant des arrangements linéaires ou angulaires¹⁵. Les HAPs de base, constitués uniquement d'atomes de carbone et d'hydrogène, sont des molécules organiques neutres et apolaires (elles ne sont pas solubles dans l'eau) (voir tableau 3).

Plusieurs centaines de molécules constituent les HAPs mais uniquement¹⁶ HAPs sont reconnus comme polluants prioritaires par l'US-EPA (Agence de protection de l'environnement des Etats-Unis) et par l'EEA (Agence de l'Environnement Européenne), en raison de leur caractère ubiquiste¹⁶, de leur abondance, de leur récalcitrance dans l'environnement et de leur caractère cancérigène et/ou mutagène.

Ces HAPs prioritaires sont composés de 2 cycles benzéniques pour le naphthalène et jusqu'à 6 cycles benzéniques pour le benzo[g,h,i]pérylène et l'indéno[1,2,3-cd]pyrène.

Propriétés physico-chimiques des HAPs

Les propriétés physico-chimiques des HAPs varient selon leur masse et leur structure moléculaire, ainsi que selon le nombre et l'assemblage des cycles benzéniques qui les constituent. Deux groupes de HAPs se distinguent :

- Les HAPs légers ou de faible poids moléculaire, composés de 2 ou 3 cycles benzéniques, qui possèdent une masse molaire comprise entre 128 et 202 g/mol. Excepté pour le naphthalène et l'acénaphthylène dont la solubilité est élevée (31,7 et 16,1 mg/l) et le fluoranthène dont la solubilité est très faible

(environ 0,2 mg/l), la solubilité des HAPs de faible poids moléculaire est comprise entre 1 et 4 mg/l. Leur temps de demi-vie¹⁷ est compris entre 2 jours et 5 ans.

- Les HAPs lourds ou de haut poids moléculaire, composés de 4 cycles benzéniques ou plus, et qui possèdent une masse molaire comprise entre 200 à 300 g/mol. La solubilité des HAPs de haut poids moléculaire de 4 cycles benzéniques est faible (comprise entre 0,002 et 0,16 mg/l). Cette solubilité décroît avec l'augmentation du nombre de cycles (entre 0,004 et 1.10⁻⁴ mg/l pour les HAPs à 5 cycles ou plus). Leur temps de demi-vie est estimé entre 1 et 6 ans (Tableau 3)

Source des HAPs

Les HAPs sont formés lors de la combustion incomplète de la matière organique. Leur origine peut être naturelle (feux de forêt, activités volcaniques, formation de l'humus, minéralisation de la matière organique et réactions géologiques associées à la formation de fuel fossile et minéral). Les teneurs liées à des sources naturelles telles que les incendies de forêt ou la synthèse par la végétation sont de l'ordre de 0,1 à 1 mg/kg de sol pour la somme des 16 HAPs prioritaires. Cependant, les HAPs sont principalement issus des activités anthropiques, la production de coke, les transports, les retombées issues des cheminées industrielles, les fuites de produits pétroliers, la fumée de barbecue ou cigarette, l'utilisation de chauffage domestique... Les HAPs accumulés dans le sol proviennent donc des rejets atmosphériques, du ruissellement, des émissions domestiques et industrielles ainsi que du déversement direct de pétrole ou de produits pétroliers sur les sols.

Etat des sols pollués en HAP en région bruxelloise

De manière générale, les nombreuses activités bruxelloises passées et présentes ont rejeté et rejettent une gamme de polluants importante. Les hydrocarbures (huiles minérales, HAPs et Hydrocarbures aromatiques monocycliques- BTX). Sur la période 2004-2006, ils ont été détectés dans 82% des sols des sites identifiés comme pollués à Bruxelles¹⁸.

¹³ PRAS : [Plan Régional d'Affectation du Sol](#)

¹⁴ Structure des HAPs, leur forme ressemble à des hexagones réguliers (voir Tableau 3)

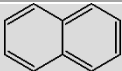
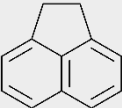
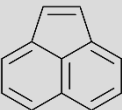
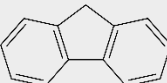
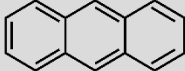
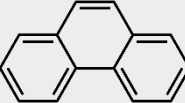
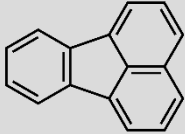
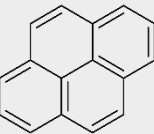
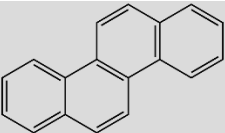
¹⁵ TSims R.C, Overcash M.R. 1983. Fate of polynuclear aromatic compounds (PNAs) in soil-plant systems. In Residue Reviews: Residues of Pesticides and Other Contaminants in the Total Environment (pp. 1-68). New York, NY: Springer New York.

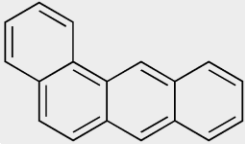
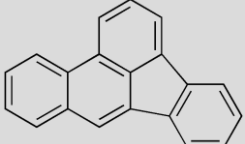
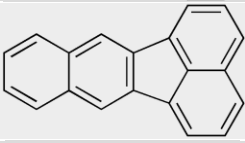
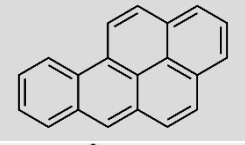
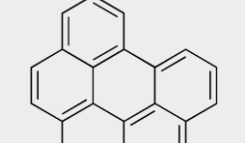
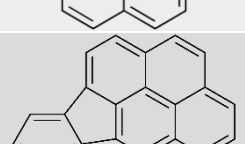
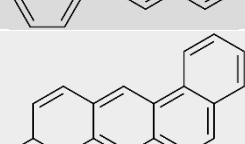
¹⁶ Ubiquiste : qui est présent partout

¹⁷ Temps de demi-vie : temps nécessaire pour que la moitié de la quantité initiale d'une certaine molécule (ici d'un HAP) se désintègre.

¹⁸ IBGE (2006). Rapport sur l'état de l'environnement Bruxellois 2006 : prévention et gestion des risques environnementaux. 84p

Tableau 3 : Structure, temps de demi-vie et dangerosité des 16 HAPs prioritaires à surveiller et à quantifier dans les sols. Source : IARC.

HAP	Formule chimique	Structure	Demi-vie dans les sols	Cancérogénicité
Naphtalène	C10H8		20-50 jours	Peut-être cancérogène
Acénaphtène	C12H10		-	Inclassable
Acénaphtylène	C12H8		-	-
Fluorène	C13H10		30-60 jours	Inclassable
Anthracène	C14H10		2-20 mois	Inclassable
Phénanthrène	C14H10		2 – 200 jours	Inclassable
Fluoranthène	C16H10		30-60 jours	Inclassable
Pyrène	C16H10		1-5 ans	Inclassable
Chrysène	C18H12		1-3 ans	Peut-être cancérogène

HAP	Formule chimique	Structure	Demi-vie dans les sols	Cancérogénicité
Benz[a]anthracène	C18H12		1-3ans	Peut-être cancérogène
Benzo[b]fluoranthène	C20H12		1-2 ans	Peut-être cancérogène
Benzo[k]fluoranthène	C20H12		2-6 ans	Peut-être cancérogène
Benzo[a]pyrène	C20H12		2-20 mois	Cancérogène
Benzo[g,h,i]perylene	C22H12		1-2 ans	Inclassable
Indéno[1,2,3-c,d]pyrène	C22H12		1-2 ans	Peut-être cancérogène
Dibenzo[a,h]anthracène	C22H14		1-2 ans	Probablement cancérogène

Les valeurs seuils

De même que pour les ETM, les seuils de concentration en HAP décrivent les valeurs au-delà desquelles on considère que le sol, l'eau ou les légumes sont pollués. Ces seuils sont fixés par la législation bruxelloise¹⁹ pour l'eau et pour le sol selon l'affectation de la parcelle au PRAS (voir chapitre précédent).

Le tableau 4 décrit les normes d'intervention et d'assainissement pour les 16 HAP prioritaires.

Tableau 4 : Normes d'intervention et d'assainissement pour le sol (M.B. du 02.05.2018).

HAPs	Normes d'intervention (mg/kg de sol sec)			Normes d'assainissement (mg/kg de sol sec)
	Zone particulière	Zone d'habitat	Zone industrielle	
Naphtalène	1,5	5	160	0,8
Acénaphène	9	14	210	4,6
Acénaphthylène	1	1	40	0,6
Fluorène	45	3950	4690	19
Anthracène	3	70	4690	1,5
Phénanthrène	60	65	1650	30
Fluoranthène	20	30	270	10,1
Pyrène	125	395	3150	62
Chrysène	10	180	320	5,1
Benz[a]anthracène	5	10,5	30	2,5
Benzo[b]fluoranthène	2	7	30	1,1
Benzo[k]fluoranthène	1	11,5	30	0,6
Benzo[a]pyrène	0,5	3,6	7,2	0,3
Benzo[g,h,i]perylene	160	3920	4690	35
Indéno[1,2,3-c,d]pyrène	1	20	30	0,55
Dibenzo[a,h]anthracène	0,5	2,9	3,6	0,3

Il n'existe à ce jour pas de norme définissant les seuils acceptables en HAP dans les légumes. Ce flou juridique provient probablement du fait que la simple présence de HAP dans les légumes devrait les exclure de facto de la mise à disposition de ces légumes pour la consommation humaine ou animale. Dans les faits, comme il n'y a pas de norme, il n'y a pas de vérification, donc pas d'analyse en HAP dans les légumes que nous achetons.

¹⁹ [29 MARS 2018 — Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale dé- terminant les normes d'intervention et les normes d'assainissement](#)

II. Phytoremédiation

Les différentes techniques de dépollution des sols se classent en deux grands groupes : *ex situ* et *in situ*. Les techniques *ex situ* vont extraire les terres et les traiter en dehors du site, alors que les techniques *in situ* vont laisser la terre en place et traiter la pollution sur le site. A Bruxelles, la technique majoritairement utilisée est l'excavation des terres polluées suivie d'un déplacement de ces terres vers une centrale agréée de dépollution, une technique *ex situ* donc. En 2018, il a été recensé que 76% des traitements des terres polluées suivaient cette manière de faire (Bruxelles Environnement, 2018). D'autres types de traitements sont appliqués dans une moindre mesure comme les traitements thermiques, chimiques ou de pompage d'eau polluée de la nappe phréatique. Ces traitements *in situ* nécessitent des temps de traitement plus longs que l'excavation et ne sont pas tous équivalents en termes d'impact sur la vie du sol et de respect de l'environnement. Pour plus d'information le lecteur peut se référer au rapport scientifique [#1 de CiDéSol](#).

Les plantes, et les microorganismes qui leur sont associés, offrent diverses possibilités pour gérer la pollution des sols. L'ensemble de ces techniques constituent la phytoremédiation.

Par rapport aux techniques classiques de dépollution (excavation, traitement chimique et/ou thermique *in situ*), elles présentent plusieurs avantages :

- elles respectent le sol en place et les organismes qui y vivent (un sol met parfois des milliers d'années à se constituer)
- elles sont accessibles un peu partout, même là où de grosses machines ne peuvent accéder
- elles sont peu coûteuses si elles sont mises en œuvre par le citoyen lui-même

Leurs principaux désavantages sont d'être relativement lentes (plusieurs années) et de demander un suivi régulier tout au long de la saison de culture.

- La **phytostabilisation** consiste à couvrir un sol de végétation afin d'empêcher les polluants du sol de se disperser (dans le sol, l'eau ou l'air), mais le sol n'est pas dépollué. Les plantes peuvent accumuler les polluants.

- La **phytoextraction** consiste à cultiver, sur sol pollué, des plantes qui accumulent certains métaux dans leurs parties aériennes. Celles-ci seront ensuite récoltées, exportées hors du site et traitées. La pollution est ainsi progressivement retirée du sol au fil des cultures. La vie du sol n'est pas ou peu perturbée, le sol initial est laissé en place ; c'est pourquoi l'on parle de dépollution douce. Une gestion des plantes récoltées est nécessaire.

- La **phytoerméioation assistée par CMA** consiste à cultiver, sur sol pollué, des plantes qui s'associent fortement à des champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA). L'association plante-champignons, permet de dégrader certains polluants organiques et renforce la vie microbienne du sol.

Les plantes récoltées sont séchées puis calcinées. Les cendres sont évacuées avec les déchets toxiques ou, dans le meilleur des cas, utilisées comme minerai, si des quantités suffisantes sont produites et qu'une filière de valorisation de ce minerai parvient à se développer.

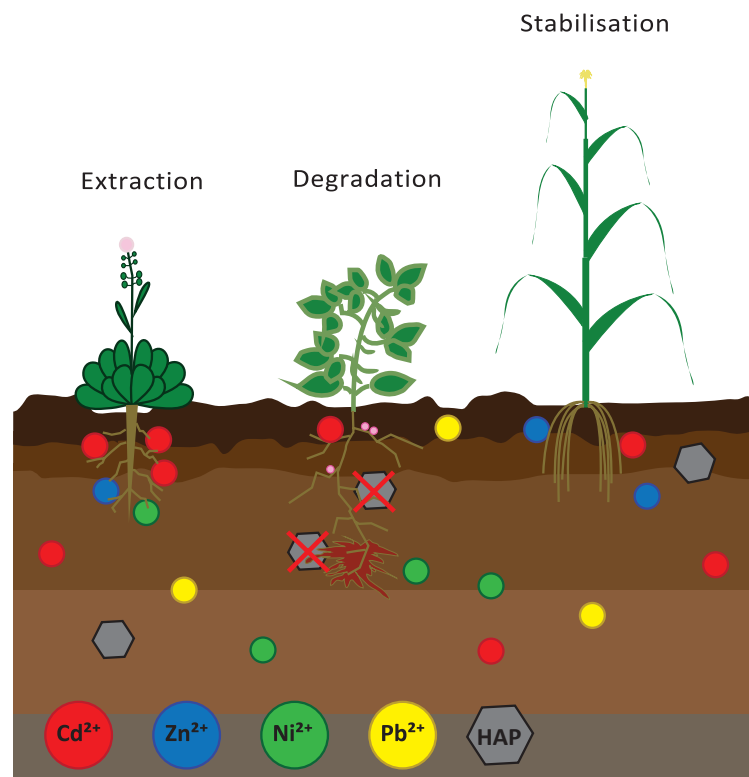


Figure 3. Principes de phytoremédiation : phytoextraction du cadmium et du zinc avec une espèce hyperaccumulatrice (ex. *Noccaea caerulea*), de phytodégradation de polluants organiques avec une espèce mycorhizée (ex. luzerne) et de phytostabilisation avec une espèce non hyperaccumulatrice (ex. maïs)

II.1. Phytoextraction

Les plantes hyperaccumulatrices

Alors que les sols métallifères, riches en métaux divers (zinc, cadmium, nickel...) sont toxiques pour la plupart des végétaux, certaines plantes s'y plaisent particulièrement bien, voire mieux qu'ailleurs : ce sont les plantes métalphytes, qui supportent les hautes concentrations en métaux du sol. Certaines métalphytes, parviennent même à extraire de grandes quantités de métaux, lorsque le sol en contient relativement peu ! Pour se protéger de la toxicité de ces métaux, elles les isolent et les stockent dans les parois de leurs cellules ou dans des organites particuliers, les vacuoles, essentiellement dans les feuilles. Les concentrations foliaires peuvent atteindre 100 à 200 fois celles que l'on retrouve dans des plantes « normales », voire plus.

En Europe, il y a notamment *Alyssum murale* qui accumule le nickel, *Noccaea caerulescens*, qui accumule le zinc, le cadmium et le nickel et *Arabidopsis halleri*, qui accumule le zinc et le cadmium.

Il va sans dire que mieux les plantes se développent, meilleure sera la dépollution.

Quelles plantes choisir :

Parmi les hyperaccumulatrices, *Noccaea caerulescens* est une championne de la dépollution pour le zinc, le cadmium et le nickel dans nos régions.

Brève présentation

Noccaea caerulescens, encore appelée tabouret bleuâtre, tabouret calaminaire ou tabouret des bois, est une petite plante herbacée de la famille des **Brassicacées** tout comme le chou, le radis, la moutarde ...

Les feuilles sont de couleur vert bleuté d'où le nom de l'espèce, *caerulescens* signifiant *bleuissant* en latin.

La plante commence par développer une rosette foliaire. Au centre de celle-ci apparaissent une, puis plusieurs tiges florales qui portent chacune de nombreuses petites fleurs blanches à 4 pétales. Les fleurs s'épanouissent du bas vers le haut et se transforment progressivement en petits fruits secs en forme de cœur, qui s'ouvrent spontanément à maturité pour libérer leurs graines

Comment reconnaître *Noccaea*:

- avant la floraison elle est visible sous la forme d'une petite rosette de feuilles vert-bleuté
- elle n'est jamais velue
- elle forme une multitude de petites fleurs blanches
- ses fruits ressemblent à de petits cœurs



Un cycle de vie en un ou deux ans

Le tabouret bleuâtre réalise généralement tout son cycle de vie en un ou deux ans, parfois plus. Il s'agit donc d'une plante tantôt annuelle, tantôt bisannuelle.

La plupart des graines germent dès la fin de l'été pour donner naissance à de petites rosettes de feuilles fort semblables à de la mâche. Non gélique, la plante passe tout l'hiver sous cette forme, supportant le manque de lumière et le froid. Sa croissance, très fortement ralentie durant cette période, reprend dès l'apparition des premiers beaux jours de l'année. Une deuxième phase de germination débute par ailleurs au printemps. Une fois la rosette de feuilles suffisamment développée, un groupuscule globuleux formé de nombreuses petites fleurs apparaît au centre de la rosette. Il est alors porté par une très courte tige qui s'allonge progressivement en un axe portant de nombreuses fleurs. Des axes secondaires apparaissent par la suite, donnant eux aussi naissance à de nombreuses fleurs. Le cycle est résumé dans la figure 4.

Son milieu de vie

Noccaea caerulea est une espèce indigène relativement rare qui pousse spontanément en Belgique. Elle forme de grandes populations sur les sols pollués par l'industrie minière, par exemple en région liégeoise. Elle pousse aussi sur des sols non pollués, notamment schisteux, mais alors sous forme de petites populations isolées, par exemple dans la vallée de l'Ourthe. Présente un peu partout en Europe, elle se développe plutôt en altitude dans les sites ouverts ou semi-ouverts. A proximité de chez nous, on la retrouve au Grand-Duché de Luxembourg, dans le Jura, les Vosges, les Alpes et les Cévennes. Elle tolère donc à la fois les sols riches en métaux (zinc, cadmium et plomb ou nickel) mais pousse aussi très bien sur des sols dits « normaux ».

Une plante qui accumule les métaux

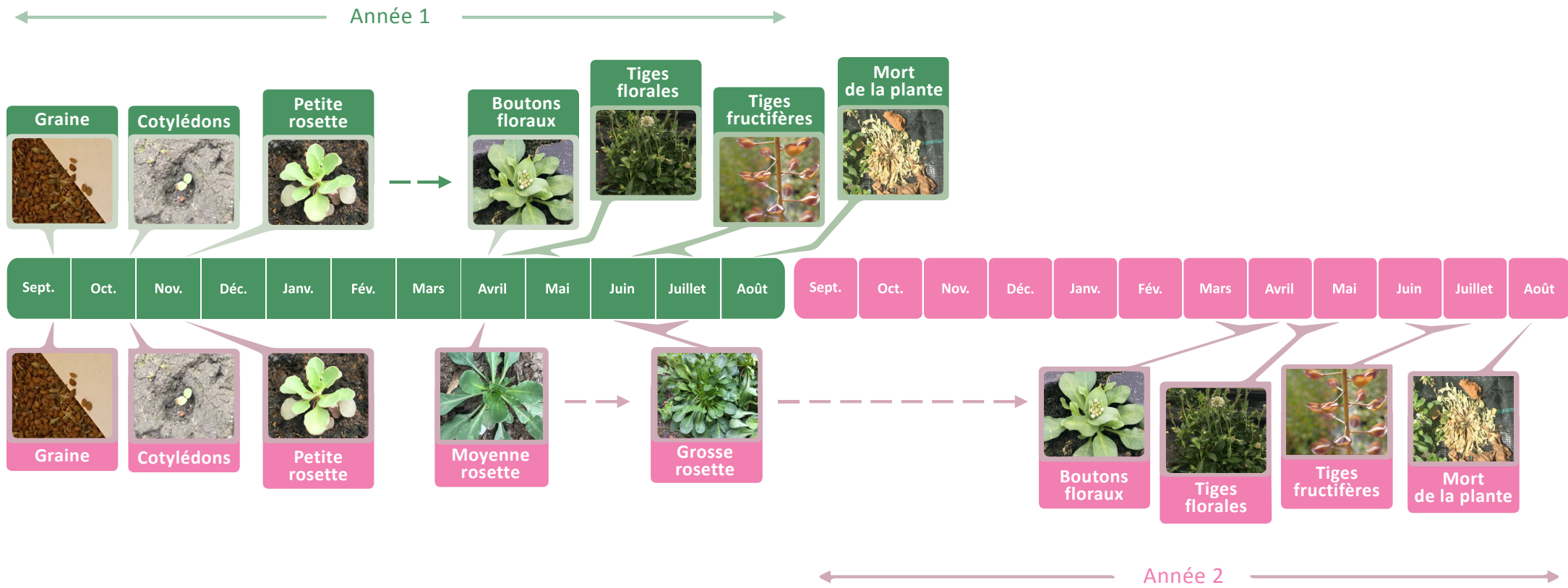
Le tabouret bleuâtre a une très grande capacité à accumuler le zinc, le cadmium et le nickel, au point d'en contenir jusqu'à 1000 fois plus que d'autres plantes poussant sur le même sol. Cette grande capacité d'extraction, combinée à une petite taille, en fait une candidate de choix pour la phytoextraction puisque de grandes quantités de métaux peuvent être extraites tout en générant de faibles quantités de déchets. Elle supporte également le plomb, mais ne l'extrait et ne l'accumule malheureusement pas.

Plusieurs variétés : Luxembourgeoise et Ganges

Noccaea caerulea est une espèce sauvage qui n'a pas fait l'objet de sélections par les horticulteurs. Cependant, des populations diverses, isolées géographiquement les unes des autres, se sont développées ici et là en acquérant des caractéristiques propres, certaines d'entre elles sur des terres naturellement riches en métaux et d'autres non. Ainsi, selon la population considérée, *Noccaea caerulea* est plus ou moins tolérante et/ou accumulatrice de métaux et apte à tolérer ou dépolluer divers types de sols contaminés en cadmium, zinc ou nickel. Par souci de simplification, on parlera ici de variétés différentes.

- La *Ganges* (GAN) est originaire du sud de la France (Cévennes). Elle a évolué sur des sites métallifères et accumule particulièrement bien le cadmium. Son cycle est généralement annuel. Elle est très sensible aux attaques des limaces et escargots. Ses feuilles sont vert glauque et légèrement crénelées, les pétales sont blanc rosâtre.
- La *Luxembourgeoise* (LUX) est originaire du Grand-Duché du Luxembourg et a évolué sur des sites non métallifères, mais a néanmoins la capacité d'accumuler de grandes quantités de zinc. Elle a un cycle plutôt bisannuel et est plus résistante aux attaques de limaces et d'escargots. Ses feuilles sont d'un vert franc et entières, les pétales sont blancs.

Figure 4 : Schéma du cycle bisannuel de *Noccea caeruleascens*



II.2. Phytoremédiation assistée par CMA

Les champignons mycorhiziens à arbuscules

Les plantes terrestres s'associent naturellement avec de nombreux organismes pour former des symbioses²⁰. Ces **symbioses** sont très répandues dans les différents écosystèmes sur Terre, aussi bien dans les zones arides, désertiques, tropicales, arctiques que dans les zones tempérées. Au niveau des racines, les plantes peuvent s'associer avec un champignon mycorhizien pour aboutir à une association mycorhizienne, bénéfique pour les deux partenaires. Cette symbiose est référée comme étant une 'mycorhize', venant du grec « *mycos* », signifiant champignon et « *rhiza* », racine.

La majorité des plantes vasculaires terrestres, environ 92%, établissent l'une ou l'autre des différentes symbioses mycorhiziennes (Figure 5). La plus répandue dans le monde végétal est la symbiose mycorhizienne à arbuscules (environ 71% des plantes établissent ce type de symbiose avec les champignons mycorhiziens à arbuscules ou CMA, appartenant au phylum des Gloméromycètes.

A retenir : La majorité des plantes potagères vivent naturellement en symbiose avec les CMA. Seules les Brassicacées (chou, moutarde, brocoli, navet, radis...), Chénopodiacées (épinard, betterave...) et Polygonacées (oseille, rhubarbe...) ne vivent pas en symbiose avec les champignons mycorhiziens.

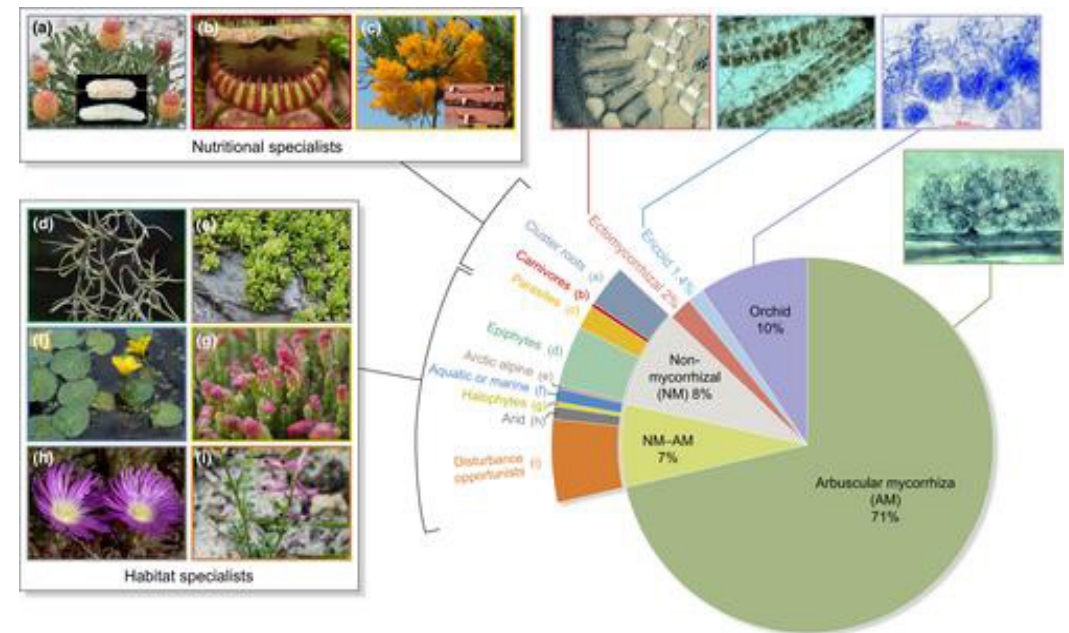


Figure 5 : La diversité relative des types de mycorhizes présentes ou non chez les plantes. AM : plantes établissant une symbiose mycorhizienne à arbuscules, Ericoid : plantes établissant une symbiose éricoïde, EM : plantes établissant une symbiose ectomycorhizienne, NM : plantes non mycotrophes, Orchid : plantes établissant une symbiose orchidoïde, NM-AM : regroupe les familles de plantes établissant de manière variable la symbiose mycorhizienne arbusculaire (méta-analyse de Tedersoo et Brundrett, 2018²¹).

²⁰ Symbiose : association à bénéfices réciproques entre deux organismes vivants.

²¹ Brundrett, M.C., Tedersoo, L. (2018). Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist*, 220, 1108-1115

Cycle de vie des champignons mycorhiziens à arbuscules

Les CMA sont des biotrophes obligatoires car ils ne peuvent pas acquérir leurs ressources carbonées par eux-mêmes. C'est donc la plante qui leur fournit le carbone issu de sa propre photosynthèse²². Il est estimé qu'environ 20% du carbone accumulé dans la plante par la photosynthèse est fourni au CMA.

Cette association se déroule en 5 étapes principales (Figure 6) :

Stade 1 : Germination des spores du champignon et émergence d'**hyphes**²³ germinatifs (Figure 6, stade 1) ;

Stade 2 : Contact racinaire et développement d'un hyphopodium (Figure 6, stade 2) ;

Stade 3 : Pénétration du champignon dans la racine et mise en place de la forme intra-racinaire du champignon. Le **mycélium**²⁴ progresse à l'intérieur du système racinaire, forme des **arbuscules**²⁵ et éventuellement des **vésicules**²⁶ chez certaines espèces (Figure 6, stade 3),

Stade 4 : La mycorhize ainsi constituée produit un réseau extra-racinaire (Figure 6, stade 3),

Stade 5 : La formation de nouvelles **spores**²⁷ (Figure 6, stade 4) le long des hyphes extra-racinaires. Après leur maturation, ces spores pourront elles-mêmes coloniser une nouvelle plante (stade 1)

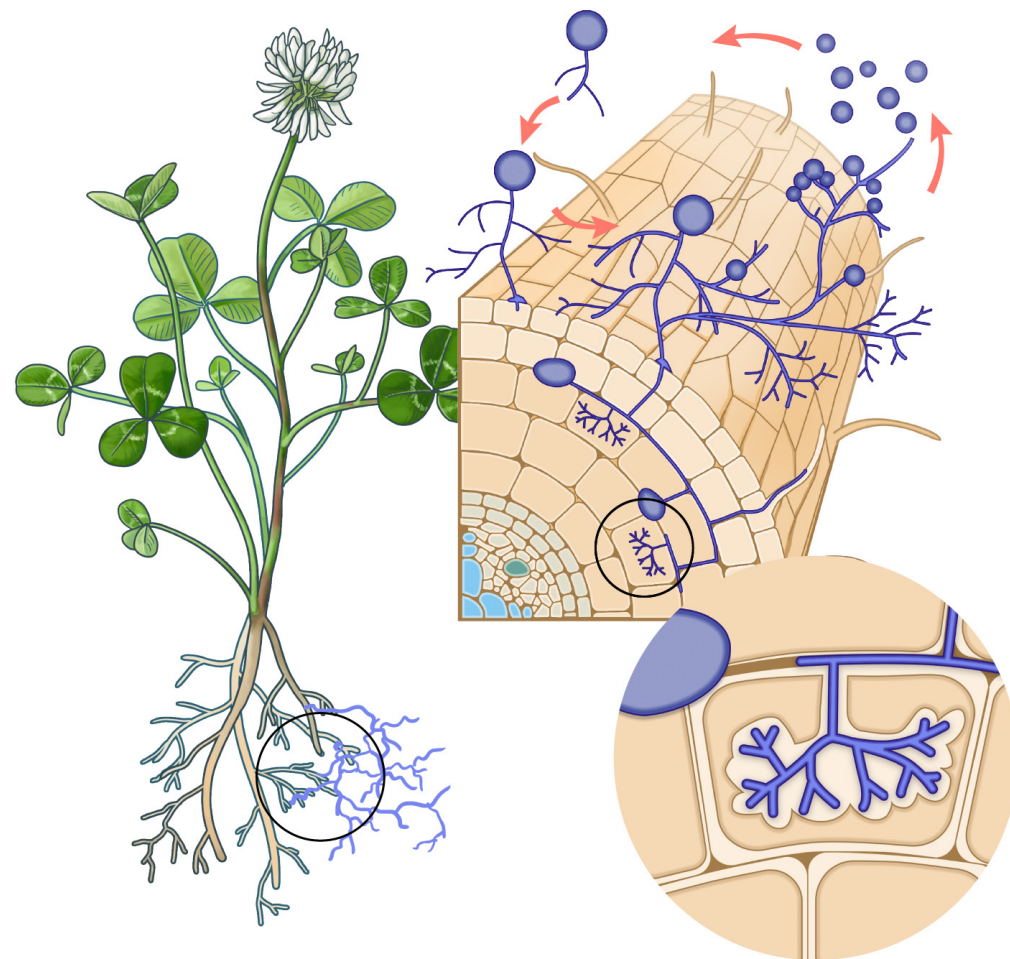


Figure 6 : Principale étape du cycle de développement des CMA. Copyright : Madelyn Neufeld on Twitter (madyrose.com).

²² Bonfante, P., Bianciotto, V. (1995). Presymbiotic versus symbiotic phase in arbuscular endomycorrhizal fungi: morphology and cytology. In Mycorrhiza: structure, function, molecular biology and biotechnology (pp. 229-247). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg

²³ Hyphe : Filament plus ou moins ramifié, non cloisonné chez les CMA, qui compose le 'corps' du champignon.

²⁴ Mycélium : Ensemble des hyphes et spores du champignon.

²⁵ Arbuscules : structure d'échange entre la racine et le CMA, à l'intérieur des racines.

²⁶ Vésicules : structure fongique de réserve du champignon.

²⁷ Spores : structures de reproduction du champignon, capable de germer et de coloniser les racines d'une plante.

A l'intérieur des racines, les hyphes du CMA progressent jusqu'aux cellules corticales internes de la racine, où ils forment des structures intracellulaires hautement ramifiées en forme d'arbres connues comme étant des arbuscules (du latin « arbusculum », signifiant buisson ou petit arbre) (Figure 7) et représentant la structure la plus importante des CMA.

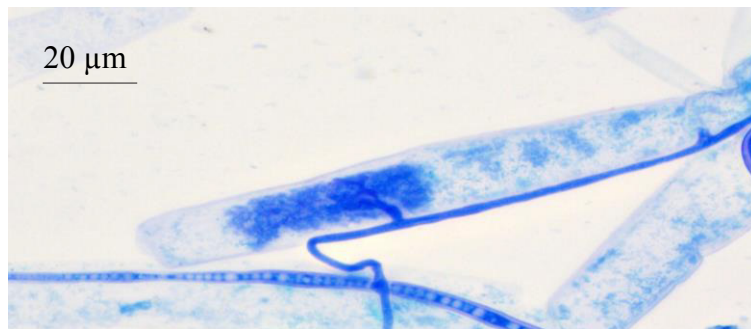


Figure 7 : photographie d'un arbuscule (petit 'arbre' bleu) dans une cellule de racine de maïs. Copyright : @Maryline Calonne, laboratoire de mycologie de l'UCLouvain.

A retenir : Les arbuscules dans la racine sont le lieu d'échange de nutriments et des ressources carbonées entre la plante et le champignon

Bénéfices de la symbiose mycorhizienne pour la plante

Amélioration de la nutrition minérale

L'interaction mycorhizienne se caractérise par un transfert d'éléments minéraux (phosphore, azote...) du champignon vers la plante en échange de carbone et de lipides de la plante vers le CMA. L'association améliore, dès lors, la nutrition hydrique et minérale de la plante, notamment en phosphore et en azote (Figure 8). Ces échanges nutritionnels réciproques sont au centre de l'association mycorhizienne et agissent en tant que composants régulateurs assurant le bon fonctionnement de la symbiose.

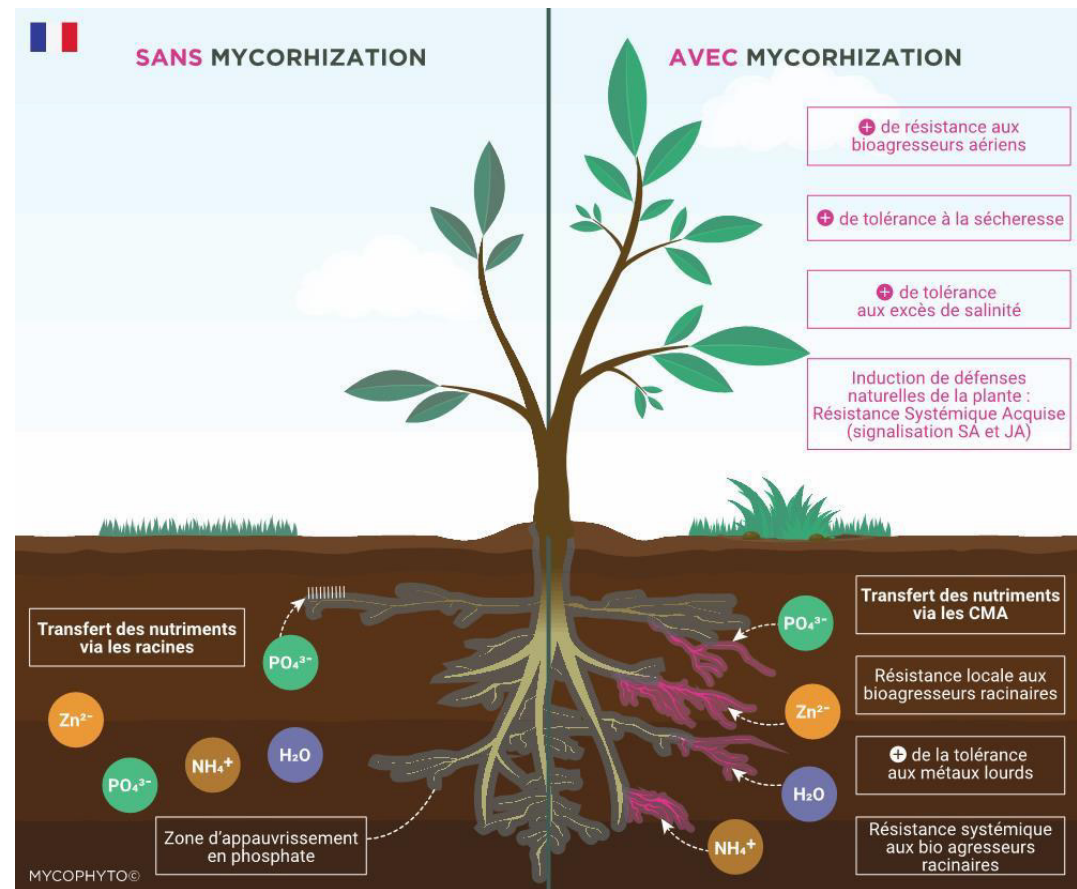


Figure 8 : Rôle de la symbiose mycorhizienne dans l'apport de nutriments à la plante hôte et bénéfices apportés à la plante. Copyright : <https://www.reussir.fr/contenu-partenaire-decouvrez-les-dernieres-avancees-sur-les-champignons-mycorhiziens-pour-les-cultures>.

Le rôle majeur des CMA est l'amélioration de la nutrition hydrique et minérale de la plante. Il en résulte généralement une amélioration de la croissance des plantes mycorhizées. En effet, l'élongation des hyphes extra-racinaires augmente la surface de contact entre les minéraux du sol et la racine et il est estimé que le CMA croît à hauteur de 1 km de réseau mycélien pour 1 m de système racinaire. De plus, ils peuvent explorer des zones non accessibles pour les racines pour y prélever l'eau et les nutriments et les transférer à la plante hôte.

Une plante mieux nourrie est une plante plus vigoureuse et dont la croissance peut être plus importante.

A noter : Les plantes mycorhizées n'ont généralement pas besoin d'apports d'engrais NPK. Au contraire, ceux-ci rendent la symbiose inopérante !

Résistance aux maladies et ravageurs

L'atténuation des dommages causés par des organismes phytopathogènes chez les plantes mycorhizées a été démontrée dans de nombreux travaux. Les CMA réduisent l'incidence et/ou la sévérité des effets néfastes causés par les champignons, bactéries ou nématodes phytopathogènes racinaires comme aériens.

Cette protection apportée par la colonisation mycorhizienne résulterait d'une combinaison de cinq principaux mécanismes d'action (Figure 9).

- La stimulation de la croissance de la plante par une meilleure nutrition, une meilleure santé végétale et la compensation par la symbiose des dommages causés par l'agent phytopathogène.
- La compétition directe ou indirecte entre les CMA et les organismes phytopathogènes, liées à la disponibilité des nutriments et des sites d'infection sur la racine.
- La transformation morphologique et architecturale de la racine, ce qui peut altérer la dynamique infectieuse du pathogène, bien que la preuve d'une corrélation ne soit pas mise en évidence à ce jour. Les CMA peuvent induire la formation des racines latérales plus épaisses.

- La modification de la microflore du sol et de l'augmentation du taux de matière organique dans les sols. Ces changements peuvent mener à la stimulation de la production de composés par la microflore avec une activité antagoniste envers certains pathogènes racinaires
- L'induction ou la suppression de certains mécanismes de défense des plantes, notamment les mécanismes enzymatiques.
- L'induction des réactions de défense au niveau des parties aériennes des plants mycorhizés (effet systémique).

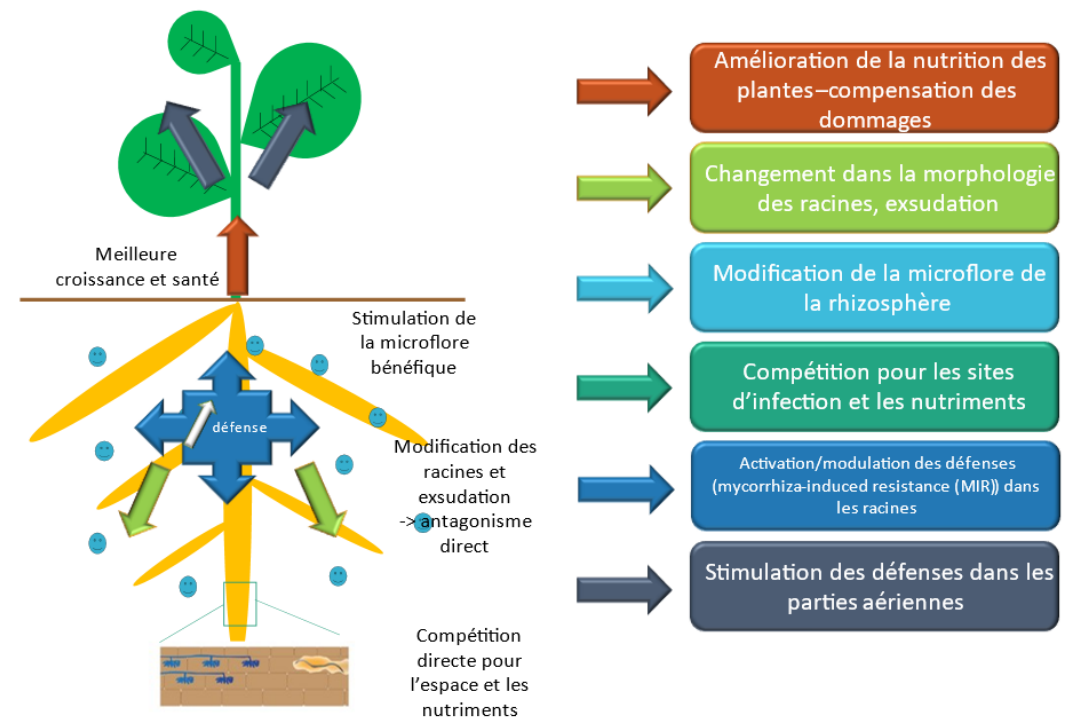


Figure 9 : Description schématique des mécanismes permettant aux plantes mycorhizées de mieux résister/tolérer les pathogènes et ravageurs. Copyright : Maryline Calonne, laboratoire de mycologie de l'UCLouvain.

A retenir : Une plante mycorhizée va mieux résister face à l'attaque d'un pathogène ou d'un ravageur

Résistance aux stress environnementaux

A côté de la protection des plantes vis-à-vis des stress biotiques, de nombreux travaux ont également décrit l'effet protecteur apporté par la mycorhization contre les stress abiotiques tels que la sécheresse, la salinité et la pollution. Cependant, les processus impliqués dans cette tolérance ne sont pas encore complètement élucidés.

✓ Effet des CMA sur la résistance des plantes face au stress hydrique

Le mycélium peut explorer un volume de sol beaucoup plus important que les racines et ainsi accéder à un réservoir hydrique plus important. Il peut, dès lors, aider au maintien de l'équilibre hydrique et minéral de la plante. La tolérance des plantes mycorhizées à la sécheresse serait donc attribuée à un ensemble de processus physiologiques dont une meilleure nutrition minérale (en particulier P et N) et hydrique, ce qui améliore la photosynthèse, la transpiration et accroît le développement de la plante. La colonisation mycorhizienne permet en effet une meilleure utilisation de l'eau et diminue la transpiration de la plante, ce qui lui permet de retenir son eau. Au laboratoire de mycologie, nous avons également montré une meilleure et plus rapide récupération de plants de maïs mycorhizés après une période de sécheresse.

A retenir : Une plante mycorhizée va mieux résister à la sécheresse qu'une plante non-mycorhizée. Cependant, l'arrosage des cultures reste indispensable en cas de sécheresse et de fortes chaleurs !

✓ Effet des CMA sur la résistance des plantes contre la pollution

Certains métaux sont nécessaires aux organismes vivants et sont considérés comme des micronutriments, comme le Zn, le Cu ou le Co à de faibles concentrations. En revanche, l'accumulation de fortes concentrations de ces composés est très toxique puisqu'ils peuvent altérer le niveau d'autres nutriments et induire la production de radicaux libres dans la plante (qui induisent un stress).

De plus, d'autres métaux sont toxiques même à de faibles concentrations. Ce sont par exemple le mercure (Hg), le Plomb (Pb), ou le Cadmium (Cd). Les premiers travaux mettant en évidence un effet protecteur des CMA pour la plante hôte contre la toxicité de fortes concentrations d'ETM ont débuté dans les années 80. De nombreux travaux ont démontré une meilleure croissance des plantes mycorhizées se développant sur un sol contaminé par les ETM. Une accumulation d'ETM inférieure dans les plantes colonisées par des CMA isolés à partir de sols contaminés ou une diminution du transport des métaux des racines vers les parties aériennes peuvent expliquer cet effet protecteur. Plusieurs facteurs seraient impliqués : (1) un meilleur apport nutritif des CMA pourrait aider à la croissance des plantes parallèlement à une diminution de la concentration en métaux dans les parties aériennes (2) une accumulation des métaux dans les hyphes du CMA, diminuant l'accès des plantes à ces éléments et (3) l'induction des défenses chez la plante permettant de mieux se protéger contre les effets délétères induits par les ETM.

En ce qui concerne les HAPs, le rôle de la colonisation mycorhizienne et les mécanismes impliqués dans la tolérance des plantes aux polluants organiques sont beaucoup moins documentés que pour les autres stress abiotiques car ils ne font l'objet de recherches que depuis 25 ans. Dernièrement, l'équipe du laboratoire de mycologie de l'UCLouvain, en association avec le laboratoire Unité de Chimie Environnementale et Interactions sur le Vivant (UCEIV) en France ont réalisé un travail de bibliographie montrant que les plantes mycorhizées ont généralement une meilleure croissance et une meilleure survie que les plantes non-mycorhizées²⁸. Les effets du stress sont également moins marqués chez les plantes associées aux CMA grâce à une combinaison d'effets similaires à celle de la résistance contre les ETM (voir paragraphe précédent).

²⁸ Lounès-Hadj Sahraoui et al., 2022. Arbuscular mycorrhizal fungi-assisted phytoremediation : concepts, challenges, and future perspectives

Comment les CMA améliorent la dépollution des sols pollués avec les HAPs ?

Dans l'étude menée au laboratoire de mycologie en association avec l'UCEIV, nous avons observé qu'environ 70% des études scientifiques démontraient une meilleure **dissipation**²⁹ des HAPs et pétrole (110 études) dans les substrats de culture des plantes mycorhizées par rapport à celles cultivées sans CMA. Cependant, très peu de ces études (4,5%) ont été menées en champ directement... Sachant que les différentes pressions environnementales (pluie, composition du sol, températures...) influencent grandement la dissipation des HAPs, l'efficacité des plantes mycorhizées à dissiper les HAPs au champ doit encore être étudiée. De plus, les études sont relativement courtes (la plus longues étaient de 180 jours), l'influence des plantes mycorhizées sur la disparition des HAPs à long terme mérite d'être étudiée également. A l'heure actuelle, il n'a pas encore été démontré que les CMA peuvent directement s'attaquer aux HAPs et réduire leur concentration dans les sols. Ce qui est connu est que les CMA agissent indirectement sur la dépollution des HAPs via différents mécanismes :

- Modification des exsudats racinaires. Cela résulte de l'excrétion dans les sols d'enzymes comme les oxydases, catalases, nitroréductases... qui s'attaquent à la structure des HAPs et permettent leur métabolisation³⁰.
- Modification du microbiome du sol. La présence des CMA modifie la composition en exsudats par les racines, ce qui modifie la qualité, l'abondance et les activités microbiennes dans les sols au niveau de la myco-rhizosphère³¹, et permet d'améliorer la métabolisation des HAPs.

Les CMA influencent également la capacité des plantes à accumuler les HAPs. Des résultats contradictoires ont été démontrés dans la littérature scientifique, probablement liés à la plante hôte, la combinaison CMA/plante hôte, la nature, la biodisponibilité³² et la concentration du HAP dans le sol, les conditions de culture...

²⁹ Dissipation : disparition. Pour les HAPs dans les sols, la dissipation comprend une partie qui est dégradée par les plantes et les micro-organismes et une partie qui est accumulée dans les racines et les parties aériennes des plantes.

³⁰ Métabolisation : transformation d'une substance, d'un composé par un organisme vivant.

³¹ Myco-rhizosphère : rhi osph re des racines mycorhi ees, c'est-à-dire le volume de sol soumis à l'influence des racines et du/des CMA qui lui sont associés.

³² Biodisponibilité : disponibilité d'un composé, d'une molécule pour l'organisme vi- vant. Par exemple une partie des HAPs est liée aux composants du sol et ne sont pas disponibles pour les plantes, alors qu'une autre partie est libre, souvent dans la solu- tion de sol, c'est la partie biodisponible.

Quelles plantes mycotrophes choisir pour dépolluer les sols pollués par les HAPs ?

Dans la littérature scientifique, la majorité des études se sont portées sur la luzerne (*Medicago sativa* L.), le raygrass (*Lolium multiflorum* L.) et la fétuque (*Festuca arundinacea* L.). Quelques études ont également été menées avec le blé, l'aubergine, le maïs, le céleri, ou le haricot.

La luzerne est une plante mycotrophe qui se développe bien sur milieux pollués par les HAPs, semble plutôt résistante au stress induit par la pollution et qui, associée aux CMA, semble induire une meilleure dissipation des HAPs dans sa rhizosphère.

Parmi toutes les plantes testées, les premiers résultats obtenus dans le cadre du projet CiDéSol semblent également indiquer une meilleure dissipation des HAPs dans les sols cultivés avec la luzerne. Les graines sont facilement accessibles dans toutes les jardinerie et cette plante est facile à cultiver et demande peu d'entretien. Cette plante pérenne sera capable de produire un bon couvert végétal pendant au moins 3 à 5 ans, si un soin particulier est apporté à la culture.

En outre, la luzerne est une plante fourragère qui s'associe aussi avec des bactéries fixatrices d'azote. La culture de cette plante permet donc de régénérer le sol en azote.



III. Comment cultiver *Noccaea caerulescens*

III.1. Généralités

Noccaea caerulescens étant une plante sauvage, il n'y a pas d'itinéraire de culture établi. L'observation de la plante dans la nature et les expérimentations menées par les universités ont donné les premières lignes de conduite. Celles-ci ont été affinées dans le cadre de la recherche CiDéSol en vue de pouvoir être appropriées par tout un chacun, qu'il soit jardinier/maraîcher ou non et que ce soit pour la production de graines ou la dépollution des sols. Avec la pratique, ces lignes de conduite sont susceptibles d'encore évoluer.

1. Répondre aux besoins de la plante

La plante préfère les sols légers, pas trop compacts et supporte une large gamme de niveau d'acidité (pH entre 5 et 7). Elle affectionne les endroits ensoleillés et supporte bien la sécheresse. L'excès d'humidité favorise l'apparition de maladies cryptogamiques (dus aux champignons) qui peuvent lui être fatales. Seule la phase de germination demande beaucoup d'humidité. Dans la nature, les graines germent d'ailleurs majoritairement au début de l'automne.

Emplacement des parcelles

L'emplacement des parcelles sera essentiellement déterminé par les besoins de dépollution. La plante peut s'accommoder d'un peu tous les milieux et seules les zones très humides ne lui conviennent pas. Cependant, dans les zones fort ombragées, son développement sera moins bon que dans les parcelles ensoleillées ce qui affectera le taux de dépollution.

Besoins en eau et arrosage

Noccaea caerulescens n'a pas besoin de beaucoup d'eau, sauf pendant la phase de germination.

Pour atteindre un bon taux de germination lors des semis, il est indispensable d'arroser abondamment la terre et de maintenir l'humidité pendant une quinzaine de jours jusqu'à l'apparition des cotylédons (les deux premières fausses feuilles de la plante). L'arrosage se fera de préférence avant le semis pour ne pas déplacer les graines qui sont très petites.

En cas de repiquage, il est conseillé d'arroser juste après le repiquage sauf si des pluies sont annoncées.

Par la suite, il ne faudra plus arroser qu'en cas de forte sécheresse.

Sol et apports de nutriments

Les apports de compost ne sont pas conseillés car certains éléments du compost ont tendance à se lier aux métaux et à les rendre moins accessibles pour l'absorption par la plante.

Les apports d'engrais ne sont généralement pas nécessaires et ne sont pas non plus recommandés. Un apport de nitrate peut provoquer par exemple une plus grande sensibilité aux maladies fongiques.

Pour la production de semences à petite échelle, nous proposons de faire la culture dans de gros pots. La terre est alors remplacée par un terreau de qualité et les pots placés dans un endroit ensoleillé. Ils peuvent éventuellement être déplacés au fil du temps. La gestion de l'eau se fait pot par pot.

2. Gérer la compétition

Noccaea caerulescens est une plante de relativement petite taille, à croissance lente pendant les 3 premiers mois, particulièrement sensible à la compétition d'autres espèces plus vigoureuses dont il y aura donc lieu de limiter le développement. Cette concurrence est d'autant plus forte qu'elle concerne des espèces mieux adaptées parce que présentes, elles, dans leur milieu naturel.

Pour la production de semences à petite échelle, la culture en pots permet d'éviter ce problème.

Contrôler les adventices

Un désherbage régulier des parcelles est indispensable pour contrôler le développement des adventices, sous peine de voir les *Noccaea* complètement étouffées par la végétation qui se met en place. Même si les *Noccaea* ne meurent pas, elles risquent de rester très petites et de ne donc pas extraire efficacement les métaux.

La première étape sera d'apprendre à les reconnaître des autres plantes, même à l'état très jeune, surtout si l'on part d'un semis !

Les planches d'illustration 1 « Cycle de vie de *Noccaea caerulescens* en photos » et 2 « Attention intrus » sont destinées à vous y aider.

Un suivi hebdomadaire permet de ne pas se laisser dépasser et s'avère finalement beaucoup plus efficace et moins lourd qu'un gros désherbage une fois que les adventices sont installées et que les racines s'entremêlent. Le développement des adventices peut être très rapide, notamment en mai-juin, quand les jours rallongent et que la température augmente !

Préparer une parcelle avec soin pour limiter le développement des adventices

Les soins apportés lors de la préparation initiale du sol impactent de façon significative le travail de désherbage ultérieur. Suivant l'état de la parcelle avant le début de la culture, ce travail de préparation sera plus ou moins important mais mieux il est fait, moins il y aura de travail par la suite ! Dans tous les cas, il y a lieu d'éliminer au maximum les adventices et de démarrer sur une parcelle propre. Il est évident que si l'on part d'une parcelle déjà cultivée, le travail sera nettement moindre que si l'on part d'une pelouse ou d'une friche.



Figure 10. Planche de culture de *Noccaea* enherbée au printemps.

- Désherber avec une bâche

En cas de parcelle fortement enherbée, il est conseillé de placer une bâche noire, au moins 4 mois avant le début de la culture.

Attention, les bâches, c'est aussi du plastique. Au fil du temps, des composés toxiques, des microplastiques ou des fils plastiques risquent de contaminer le sol. Utilisez-les donc avec modération et juste le temps nécessaire. Préférez les plastiques non tissés.

Côté pratique :

La bâche empêche la lumière de passer et les plantes en place meurent avant de se décomposer sous l'action des organismes du sol. En fin de processus, on obtient une terre propre, meuble et facile à travailler, mais qui contient encore de nombreuses semences.



- Pratiquer un faux semis

Cette technique vise à éliminer les adventices qui apparaissent naturellement par germination suite au travail du sol. Appliquée juste avant une culture, elle permet de réduire fortement le travail de désherbage durant les premières semaines.

Côté pratique :

Après avoir travaillé le sol, la terre est laissée à nu pendant deux à trois semaines. Les graines qui ont été ramenées en surface germent dès que les conditions leur sont favorables. Les plantules seront détruites avant de semer ou repiquer des *Noccaea*.

- Aérer le sol en surface à la grelinette ou à la fourche bêche.
- Déraciner et retirer les adventices.



- Passer le râteau pour émietter et aplanir la terre.
- Placer les protections et des pièges anti-limaces pendant 2 à 3 semaines.

- Laisser la terre dans cet état travaillé durant 2 ou 3 semaines.
- Refaire un désherbage juste avant le semis ou le repiquage des *Noccaea*.



- Cultiver avec une toile de paillage



Afin de limiter le travail de désherbage durant toute la saison de culture, il est également possible d'utiliser une bâche horticoles ou toile de paillage. Celle-ci n'élimine pas complètement l'apparition des adventices mais permet de les limiter fortement tout en facilitant également le repérage des *Noccaea* parmi

les adventices. Par contre, la bâche rend le travail de désherbage plus complexe car les herbes se concentrent là où des trous ont été ménagés pour installer les *Noccaea*.

Attention car la bâche est un bon abri pour les limaces qui y trouvent chaleur et humidité ! Il faudra impérativement placer une barrière anti-limaces(voir point suivant) et s'assurer que plus aucune limace n'est présente dans la parcelle avant de poser la toile de paillage. Les remarques concernant les risques liés à la dégradation du plastique sont les-mêmes que pour les bâches de désherbage.

Côté pratique :

- Juste avant le semis/repiquage, dérouler une toile de paillage
- Perforer des trous tous les 10 cm en tous sens (il existe des bâches avec des carrés dessinés pour faciliter l'espacement entre les plants)
- Fixer la bâche avec des agrafes de fixation pour toiles de paillage
- Semer ou repiquer dans les trous (les plants sont repiqués quand ils ont 6 à 8 feuilles).

3. Installer des protections contre les ravageurs

Les limaces et escargots sont très friands des Noccea (particulièrement la variété Ganges) mais d'autres ravageurs comme les chats, les oiseaux... peuvent parfois aussi détruire toute une culture rapidement. Mieux vaut prendre les devants que la culture se fasse en pots ou en pleine terre !

Protéger les cultures contre les attaques des limaces et escargots

Noccea caerulescens est particulièrement appréciée des gastéropodes qui n'hésitent pas à dévorer tout un semis en quelques jours. Parvenir à protéger la plante de ces attaques est indispensable si l'on veut pouvoir l'utiliser pour dépolluer un sol. C'est d'autant plus vrai qu'en cas de prédation, les métaux pénètrent dans le corps des gastéropodes avant de se disperser dans tout l'environnement via leurs excréments, ou via les chaînes alimentaires et les processus de décomposition. La variété Ganges est nettement plus sensible aux attaques que la variété Luxembourgeoise. Diverses techniques permettent de limiter les attaques des limaces et escargots. Bien souvent, il est conseillé d'en combiner plusieurs.

- Les bandes de cuivre

Le cuivre exerce un effet répulsif contre les gastéropodes.

Les bandes de cuivre autocollantes sont très pratiques en cas de culture en pots, utilisée notamment pour la production de graines.



Matériel :

- bande de cuivre autocollante de 1,5 à 2 cm de large
- pots de 12-15 l

Installation :

- bien nettoyer l'extérieur des pots
- coller une bande de cuivre sur tout le pourtour en veillant à ce que les deux extrémités se superposent

Entretien :

- vérifier de temps à autre que la bande n'est pas endommagée et interrompue

Il est également possible de coller cette bande de cuivre sur une bande de PVC souple et d'entourer toute une parcelle avec celle-ci afin de constituer une barrière contre les gastéropodes en pleine terre.

Matériel :

- rouleau de plastique souple de 30-40 cm de haut
- bande de cuivre autocollante de 1,5 à 2 cm de large
- petits piquets en bois

Installation :

- la parcelle doit avoir été préalablement préparée (voir préparer une parcelle avec soin page 24)
- dérouler le rouleau de plastique et le couper à bonne longueur (périmètre de la parcelle + 10 à 20 cm)
- coller une bande de cuivre sur toute sa longueur
- fixer le plastique sur le pourtour de la parcelle en l'enfonçant dans le sol de façon à former une barrière chimique hermétique
- si la bordure se laisse aller, la maintenir avec de petits piquets en bois

Entretien :

- vérifier de temps de temps à autre que la bordure n'est pas endommagée et reste bien en place notamment au niveau du sol et qu'aucune plante de l'extérieur de la parcelle ne fait de pont vers l'intérieur.



- Les barrières anti-limaces

Une barrière infranchissable ou difficilement franchissable par les limaces et escargots constitue une des meilleures façons de protéger les parcelles de dépollution des dégâts causés par ces ravageurs.

Matériel :

- Piquets en bois de 60 cm
- Voile style moustiquaire de 60 cm de haut
- Agrafes et agrafeuse
- Masse
- Mètre

Installation :

La parcelle doit avoir été préalablement préparée (voir préparer une parcelle avec soin page 24)

- Mesurer le périmètre de la parcelle et découper le voile en prévoyant une vingtaine de cm de plus
- Installer des piquets sur tout le périmètre de la parcelle à maximum 1m les-uns des autres
- Les enfoncer de 30 cm à l'aide de la masse
- Tendre le voile entre les piquets en veillant à ce qu'il puisse être enterré de 10 cm au sol et replié par-dessus les piquets de façon à former une rigole orientée vers le bas
- Agraffer progressivement, le long et au-dessus des piquets
- Terminer au niveau d'un piquet en superposant les deux bouts afin d'assurer l'étanchéité

Entretien :

- Surveiller régulièrement l'apparition de traces de prédation ou la disparition de plants
- Vérifier l'étanchéité du dispositif, surtout si des dégâts apparaissent sur les cultures :
 - au niveau du sol
 - tout autour du voile : trous, déchirures, plantes qui font le pont entre l'extérieur et l'intérieur de la zone de culture



D'autres types de barrières sont disponibles dans le commerce : barrières en plastique, en acier galvanisé...



- Les pièges à bière

La bière est connue de longue date pour son pouvoir attractif sur les limaces et escargots. Les jardiniers l'utilisent depuis longtemps comme appât dans leurs pièges. Cependant, les pièges à bière utilisés seuls risquent aussi d'attirer les ravageurs dans la parcelle. Nous proposons de les utiliser en combinaison avec la barrière anti-limaces.

Matériel :

- Pièges à limaces du commerce
ou

Bocaux en verre style « confiture bonne-maman » et petite planche, morceau d'ardoise ou morceau de plastique rigide pour confectionner un toit afin d'éviter que la pluie n'entre et ne dilue la bière.

- Prévoir 1 piège pour 2m²
- Bière

Installation :

- Remplir chaque piège avec de la bière
- Enterrer partiellement le piège au milieu des plantations à raison de 1 pour 2m²
- Placer le toit

Entretien :

- Relever le piège au moins une fois par semaine
- Nettoyer, remplacer la bière et remettre en place

Les pièges doivent être placés sur la parcelle quelques semaines avant les semis de *Noccaea* afin d'éradiquer au maximum les limaces et escargots.

Installés en combinaison avec la barrière anti-limaces, ils permettent de vérifier l'étanchéité de la barrière avant les semis ou d'agir rapidement en cas de perméabilité.

Si aucun dégât n'est observé sur les plantes ou qu'il n'y a aucune capture, ils peuvent être retirés.

- Les granulés, en dernier recours !

En dernier recours, des granulés de phosphate de fer peuvent être utilisés si des dégâts importants sont observés malgré la barrière anti-limaces et les pièges à bière, ou si la parcelle est trop grande que pour installer une barrière. Autorisés en agriculture biologique, ces granulés doivent néanmoins être utilisés en quantité raisonnable.

Matériel :

- Granulés de phosphate de fer acceptés en culture biologique

Installation :

- Mettre 1 poignée de granulés par m² en cas de traces de prédation

Suivi et entretien :

- Les granulés étant soluble dans l'eau, les renouveler après les épisodes de pluie
- Vérifier si les dégâts diminuent ou s'arrêtent

Protéger les cultures d'autres ravageurs éventuels

Même si cela s'avère moins fréquent, les cultures peuvent subir l'attaque d'autres ravageurs : un chat qui vient faire ses besoins, des poules ou autres oiseaux qui grattent la terre à la recherche de vers de terre, le passage d'un renard... l'inattention d'un voisin qui piétinerait le site...

En fonction du lieu, d'autres protections peuvent être nécessaires.

En début de culture, les semis peuvent, par exemple, être protégés par un grillage, un filet ou un voile d'hivernage posé sur la parcelle.

4. Les techniques de culture : semis direct et repiquage

Deux grandes techniques sont possibles pour installer les cultures :

- le semis direct en pleine terre ou en pots (pour la production de graines)
- la production et le repiquage de plantules

Le semis

Le semis est la première étape pour obtenir des plantes. Il peut être réalisé directement en pleine terre dans la parcelle à dépolluer, dans de gros pots pour la production de semences ou en contenants divers dans le but de produire des plants pour un repiquage ultérieur.

- Le semis direct dans les parcelles de dépollution

Les graines sont semées en place dans la parcelle à dépolluer. La densité visée est d'environ 100 plants/m², soit un plant tous les 10 x 10 cm.

La parcelle doit avoir été préparée préalablement (voir préparer une parcelle avec soin page 24).

- Arroser abondamment le sol : la terre doit être détremmée pour permettre la germination.
- Semer en lignes plutôt qu'à la volée afin de pouvoir plus facilement repérer la germination : creuser des sillons de maximum 1 cm de profondeur et espacés de 10 cm, semer en surface, 2-3 graines tous les 5 cm, ne pas recouvrir de terre.



- Si possible, couvrir d'un voile d'hivernage ou d'un plastique transparent pendant 2 à 3 semaines pour garder l'humidité (la terre doit rester détremmée pendant toute la phase de germination).
- Vérifier la levée du semis : les graines germent en 1 à 3 semaines.

- Le semis direct pour la production de semences

Les graines sont semées en place dans de gros pots de 15l à raison de 5-7 graines par pots.

- Remplir les pots d'un terreau de qualité et arroser abondamment (le terreau doit être détremmé).
- Pendant la phase de germination, placer le pot dans une coupelle remplie d'eau pour maintenir l'humidité.
- Semer les graines en surface en les espaçant régulièrement.
- Si possible, couvrir d'un film plastique ou d'un couvercle transparent jusqu'à la germination.
- Vérifier la levée du semis : les graines germent en 1 à 3 semaines.
- Retirer la coupelle et le film plastique dès que les graines ont germé.

- La production de plantules

Les graines peuvent être semées en alvéoles, en mini-mottes, dans des barquettes ou des plateaux. Toutes ces techniques sont plus ou moins équivalentes. Les alvéoles et les mini-mottes permettent de mieux individualiser les plants, ce qui facilitera le repiquage par la suite.

L'utilisation de terreau (qui ne contient pas de graines) permet de distinguer facilement les plantules de *Noccaea* et de ne pas les confondre avec d'éventuelles adventices, mais il est également possible d'utiliser la terre du jardin pour autant qu'elle ne soit ni trop lourde, ni trop collante.

Les semis en alvéoles et en mini-mottes permettent d'obtenir des plants facilement séparables les uns des autres.

Quelle que soit la technique utilisée, les semis seront placés en serre ou en miniserre, ce qui permet de maintenir une humidité suffisante le temps de la germination, protège les semis des ravageurs et les empêche d'être inondés en cas de fortes pluies.



- Le semis en alvéoles



- Utiliser une plaque alvéolée avec des alvéoles de 3-4 cm de côté.
- Remplir les alvéoles de terreau, tasser légèrement et arroser.
- Placer la plaque alvéolée dans un bac avec un fond d'eau pour maintenir l'humidité.
- Déposer délicatement une graine par alvéole.
- Placer dans une serre, une couche ou une mini-serre.

- Le semis en mini-mottes

- Préparer du terreau bien humidifié (lorsque l'on presse une poignée de terreau dans la main, l'eau doit couler goutte à goutte)
- Former des mini-mottes de 4 x 4 cm à l'aide d'un presse-motte et les poser côte à côte dans un bac.
- Déposer délicatement une graine par mini-motte.
- Placer dans une serre, une couche ou une mini-serre.



- Le semis en barquettes ou en plateaux



- Déposer une bonne couche de terreau dans le fond d'une barquette ou d'un plateau.
- Arroser abondamment pour que le terreau soit détrempe.
- Déposer délicatement les graines en surface en les espaçant de 3 cm en tous sens. Éventuellement, tracer de légers sillons tous les 3 cm.
- Mettre un couvercle transparent ou placer dans une serre ou une couche.

Par la suite et dans tous les cas :

- Vérifier régulièrement que la terre reste humide. Au besoin arroser avec un spray léger afin de ne pas déplacer les graines.
- Au bout d'une à deux à trois semaines, lorsque les graines commencent à germer et que les deux premières feuilles (cotylédons) apparaissent, espacer les arrosages.
- La croissance est très lente au début et la plante reste longtemps petite.

Le repiquage

Le repiquage doit se faire lorsque les plants ont atteint le bon stade de développement, soit 6-8 feuilles, y compris les deux toute premières feuilles (cotylédons). Si les plantes restent trop longtemps dans leurs alvéoles, en mini-mottes ou dans leur plateau, elles finissent par manquer de nutriments ce qui représente un stress et risque de provoquer une floraison précoce.



Replanter les plants dès qu'ils ont 6 à 8 feuilles et forment une petite rosette.

- Faire de petits trous dans la terre espacés de 10 cm en tous sens.
- Insérer un plant par trou en évitant d'enterrer la base de la rosette (la plante semble flotter au-dessus de la surface du sol), refermer **sans enterrer la base des feuilles et sans tasser**.
- Arroser.

- Pour la dépollution, le repiquage se fera en pleine terre dans la parcelle à dépolluer.
- Pour la production de semences, le repiquage se fera dans des gros pots de 12-15 L remplis de terreau, à raison de 5 à 7 plantes par pot. La culture en pot facilite la récolte des graines.

Le repiquage ne peut se faire en période de gel !

Le suivi des cultures

Un suivi régulier est le gage de la réussite des cultures. Il permet d'intervenir rapidement en cas de problème ainsi que de détecter le bon moment pour effectuer les récoltes. Un passage hebdomadaire est conseillé.

La récolte

Selon l'objectif recherché, la partie récoltée et le moment de récolte sont différents ! Il n'est pas possible de mener une même culture à la fois pour extraire les métaux du sol et pour récolter des semences.

- La récolte des plants pour la phytoextraction

L'objectif est alors d'extraire un maximum de métaux du sol, métaux qui se stockent essentiellement dans les feuilles de la plante. Lorsque la plante fleurit, les feuilles fanent, se décomposent et relâchent les métaux qu'elles ont accumulés. **Lorsque l'on cherche à dépolluer, la récolte des feuilles doit donc se faire lorsque les feuilles ont atteint un développement optimal, mais avant la floraison.**

Idéalement, la récolte des plantes se fait lorsque les rosettes atteignent 15-20 cm de diamètre et comportent de nombreuses feuilles :

- A l'aide d'un bon couteau ou d'un sécateur, couper les rosettes au ras du sol en évitant le plus possible de prendre de la terre. Laisser les racines en terre.



Rincer les plants et les faire sécher.

- Ajouter les éventuelles tiges florales récoltées préalablement.
- Stocker les plantes sèches dans des sachets en papier avant de les remettre à l'ULB pour traitement et analyse.

Si la plante commence à fleurir très tôt, alors que les feuilles sont encore petites et peu nombreuses, il est conseillé de couper les tiges florales à la base afin de retarder le plus possible la floraison. Ces tiges florales doivent être séchées et conservées pour être ajoutées à la récolte des feuilles afin d'être traitées car elles contiennent cependant une quantité non négligeable de métaux.

Attention :

Ne pas laisser les plantes se décomposer au sol car elles relarguent alors les métaux accumulés sous des formes parfois plus disponibles.

Ne jamais déposer les plantes au compost ou dans les déchets verts car les métaux lourds accumulés par la plante seront relâchés dans le compost !

Faire sécher et conserver les tiges florifères qui auraient été coupées durant le cycle de culture afin de les remettre en même temps que les feuilles pour analyse et traitement car elles peuvent également contenir des métaux.

- La récolte des semences

L'objectif étant de récolter un maximum de semences, la plante sera laissée en place jusqu'à la fin de son cycle de vie. Au moment de la récolte, la plupart des feuilles de la plante seront fanées et se seront décomposées. La culture pour la production de semences ne peut donc se faire sur sol pollué (les métaux seraient relargués dans le sol) et ne permet de toute façon pas de récolter les feuilles.

Idéalement, la récolte des graines se fait lorsque les fruits sont tout-à-fait mûrs. Cependant, les plantes fleurissent et fructifient progressivement, pendant plusieurs semaines : chaque tige florale s'allonge progressivement, les fleurs s'épanouissent du bas vers le haut puis de nouvelles tiges florales apparaissent progressivement. De même que les fleurs, les fruits apparaissent et mûrissent progressivement depuis le bas vers le haut des tiges. Ils ont la forme de petits cœurs d'abord verts puis brun-jaunâtre. **Lorsqu'ils sont mûrs, ils s'ouvrent spontanément dès qu'on les touche**, laissant apparaître 2 compartiments contenant chacun 4 à 8 graines. Il n'est pas possible d'avoir toutes les graines, certaines resteront accrochées aux hampes florales, c'est une perte inévitable.

- Cueillir les tiges florales entières en les coupant délicatement à la base avec des ciseaux lorsqu'elles deviennent brun-jaunâtre et qu'environ 50 % de leurs fruits sont mûrs. Les fruits déjà bien formés mais encore verts continueront à mûrir ! Il est important de noter que tous les fruits n'arrivent jamais à maturité au même moment et la récolte des fruits un par un n'est pas réaliste car trop fastidieuse.

- Placer les tiges florales tête en bas dans un seau ou un sachet en papier ouvert pour qu'elles conti- nuent à sécher, sinon les graines risquent de pourrir !



- Stocker le tout dans un endroit aéré, à l'abri des rayons directs du soleil jusqu'à la fin de la récolte.

- Extraire les graines des fruits en battant les tiges florales contre le bord d'un seau puis tamiser. Un *chinois* fera l'affaire.



Cette année : Les graines de tous les semenciers ont été triées, tamisées et rassemblées par variété lors de la rencontre annuelle des semenciers (13.09.2023). Les restes de plantes ont été rassemblés et emportés par l'ULB.

L'année prochaine : Une fois la récolte terminée, les graines seront conservées dans un petit pot avec couvercle en n'oubliant pas de noter la variété et l'année de récolte. Les restes de plantes séchées issues du tamisage seront rassemblés dans une grande enveloppe et envoyés à l'ULB en même temps que les graines.

III.2. Les itinéraires de culture

Comme *Noccaea caerulescens* n'a jamais fait l'objet de sélections pour favoriser tel ou tel caractère ou comportement, cela se traduit par une grande diversité génétique et une grande variabilité de comportements. La plante n'étant pas cultivée, si ce n'est dans le cadre de projets de dépollution, on ne trouve pas, dans la littérature, d'itinéraire de culture bien établi.

Les itinéraires proposés ci-après sont basés sur les expérimentations menées par les Universités ainsi que par la recherche CiDéSol. Ils sont encore susceptibles d'évoluer.

Selon que l'on cherche à produire des graines ou à dépolluer, les itinéraires de culture sont sensiblement différents.

Ainsi, deux itinéraires principaux sont proposés :

- l'un pour dépolluer, et donc favoriser le cycle végétatif, la production de feuilles ;
- l'autre pour favoriser la production de semences, si possible durant la première année de culture.

Détaillés ci-dessous, ils sont repris de façon synthétique dans les fiches techniques en annexe.

1. Itinéraire de culture pour la dépollution de sites contaminés par des métaux

Objectif : Favoriser la production de feuilles car c'est là que s'accumulent les métaux ; retarder le plus possible la floraison et obtenir un bon recouvrement de la parcelle (idéalement 100 plants/m².)

Lorsque l'on cherche à dépolluer, les techniques de cultures viseront à favoriser la production de feuilles car c'est là que s'accumulent les métaux. Inversement, il faudra retarder le plus possible la floraison car la plante met alors son énergie dans la production des fleurs et des graines, au détriment des feuilles. La production de feuilles s'arrête lorsque la plante fleurit, et les feuilles déjà formées finissent par faner et se décomposer. Les métaux accumulés dans celles-ci sont alors relâchés à la surface du sol, parfois sous une forme plus assimilable que précédemment.

Pour dépolluer un sol contaminé au cadmium, privilégier la variété Ganges.

Pour dépolluer un sol contaminé au zinc, privilégier la variété Luxembourgeoise.

Si les deux éléments sont présents en excès, alterner les cultures de Luxembourgeoises et de Ganges et éviter le croisement des deux variétés

Les cultures peuvent être menées à deux moments différents de l'année :

- Semis au tout début de l'automne, courant du mois d'octobre, en vue de récolter les plantes en mai/juin ; on parlera de **cultures d'hiver**.
- Semis au début du printemps, courant du mois de mars, dans le but de récolter les plantes à la fin de l'été ; on parlera de **cultures de printemps**.

Deux techniques sont proposées pour la mise en place des plantes :

- Le **semis direct** où les graines sont directement semées en place dans la parcelle à dépolluer. C'est la technique qui semble demander le moins de travail, l'étape de production des plants étant éliminée. Il faudra cependant être capable de reconnaître les toutes jeunes plantules afin de pouvoir assurer correctement le désherbage et de contrôler parfaitement les ravageurs, qui peuvent détruire toute une culture en une nuit. Cette technique est à privilégier une fois que l'on connaît un peu la plante, que l'on maîtrise les ravageurs ou dans les parcelles de grande dimension.
- La **production de plantules** suivie d'un **repiquage** en place. Cette technique comporte une étape de plus, mais le semis est plus facile à contrôler et les plants sont déjà plus vigoureux et reconnaissables au moment où ils sont mis en place. Son taux de réussite est supérieur, surtout pour les débutants et pour autant que les parcelles ne soient pas de trop grande dimension.

Selon les conditions météorologiques, le site, la présence ou non de ravageurs, il pourra être nécessaire de combiner plusieurs techniques et périodes de semis pour atteindre un recouvrement suffisant (environ 100 plants/m²). Ainsi, par exemple, un semis d'automne peut être complété par un repiquage de plants en hiver, par un second semis voire un second repiquage au printemps. Il sera toujours prudent de préparer des plants de réserve en vue du repiquage.

Quelques points d'attention pour réussir sa dépollution :

- Le repiquage engendre un stress qui favorise le déclenchement de la floraison. Si l'on choisit de procéder par repiquage, les plants seront repiqués sans tarder, dès qu'ils ont 6 à 8 feuilles et forment une petite rosette.
- Bien anticiper le travail de préparation des parcelles qui peut fortement varier en fonction de leur état initial (voir préparer une parcelle avec soin page 24). La dernière étape, le faux semis, se fera durant le mois qui précède le semis ou le repiquage.
- Installer les protections anti-limaces avec soin avant le semis ou repiquage pour éviter de perdre tous les plants.
- Une fois les plants bien installés, ils ne demandent plus beaucoup de soins, mais une surveillance hebdomadaire est de rigueur. Les éléments à tenir à l'œil sont :

L'arrosage :

De façon générale, les *Noccaea* supportent bien la sécheresse et il n'est généralement pas nécessaire d'arroser.

En cas de forte sécheresse cependant (aucune pluie pendant 3 semaines) : arroser à raison de 5 à 10 L par m² et par semaine, jusqu'au retour de la pluie.

La gestion des ravageurs :

En cas de dégâts de limaces et d'escargots : rechercher et retirer les organismes présents puis placer et relever des pièges anti-limaces jusqu'à ce qu'on ne capture plus aucune limace ou escargot. Attention, durant la journée, les limaces se cachent souvent sous des planches, des pots, parmi les adventices... Tous ces endroits doivent être contrôlés dès qu'une attaque est observée.

La gestion des adventices :

Afin d'éviter la compétition entre *Noccaea* et les autres espèces, un désherbage régulier est indispensable ; plus il sera effectué tôt, plus il sera facile et plus les *Noccaea* grandiront vite.

La floraison :

Il est possible que des fleurs apparaissent en cours de culture : couper les tiges florales à la base dès qu'elles apparaissent pour limiter la floraison, les faire sécher et les conserver pour les remettre à l'ULB en même temps que les feuilles pour analyse.

Les maladies :

Il arrive que les plantes dépérissent alors qu'elles n'ont pas fleuri. Les rosettes de feuilles jaunissent et se décomposent. Il faut alors procéder à la récolte pour éviter que la plante en décomposition ne relargue tous les métaux accumulés dans le sol.

La récolte des plants :

La récolte des plants se fait normalement à la fin de l'été lorsque les rosettes foliaires ont atteint leur développement maximal. Pour les détails pratiques, voir *TECHNIQUES DE CULTURE: La récolte page 31*. Mais il peut arriver de devoir récolter plus tôt, si la majorité des plants se mettent à fleurir (voir floraison) ou s'ils se mettent à dépérir (voir maladies). Il est important de poursuivre le suivi de la parcelle jusqu'au moment de la récolte pour détecter le bon moment !

Attention :

Ne pas laisser les plantes se décomposer au sol car elles relarguent alors les métaux accumulés sous des formes parfois plus disponibles.

Ne jamais déposer les plantes au compost ou dans les déchets verts car les métaux lourds accumulés par la plante seront relâchés dans le compost ! Faire sécher et conserver les tiges florifères qui auraient été coupées durant le cycle de culture afin de les remettre en même temps que les feuilles pour analyse et traitement car elles peuvent également contenir des métaux.

Côté pratique

A. La technique par semis direct

Matériel :

- Graines

1. La préparation de la parcelle

Bien anticiper le travail de préparation des parcelles qui peut fortement varier en fonction de leur état initial (voir chapitre III comment cultiver *Noccaea caerulea* : La préparation de la parcelle, La technique du faux semis et La pose des toiles de paillages). La dernière étape qui consiste à préparer le sol à accueillir les semis se fera durant le mois qui précède, soit dans le courant du mois de septembre, soit dans le courant du mois de février, en dehors de toute période de gel et quand le sol n'est pas détrempé.

Au même moment, placer les barrières et les pièges anti-limaces (voir Chapitre III.1.3 page 26).

2. Le semis en pleine terre

Suivant la période de culture envisagée, le semis se fera dans le courant du mois d'octobre ou de mi-mars à mi-avril (voir chapitre III.1.1)

Les graines seront semées en lignes plutôt qu'à la volée afin de pouvoir plus facilement repérer la germination des *Noccaea* des autres plantules qui pourraient germer. La den-

sité visée étant d'environ 100 plants/m², soit un plant tous les 10 x 10 cm, le semis se fera à raison de 2-3 graines tous les 5 cm, dans des sillons espacés de 10 cm. Veiller à maintenir une très forte humidité pendant les 15 jours qui suivent le semis à l'aide d'un voile d'hivernage ou d'un plastique transparent.

3. Le suivi des cultures :

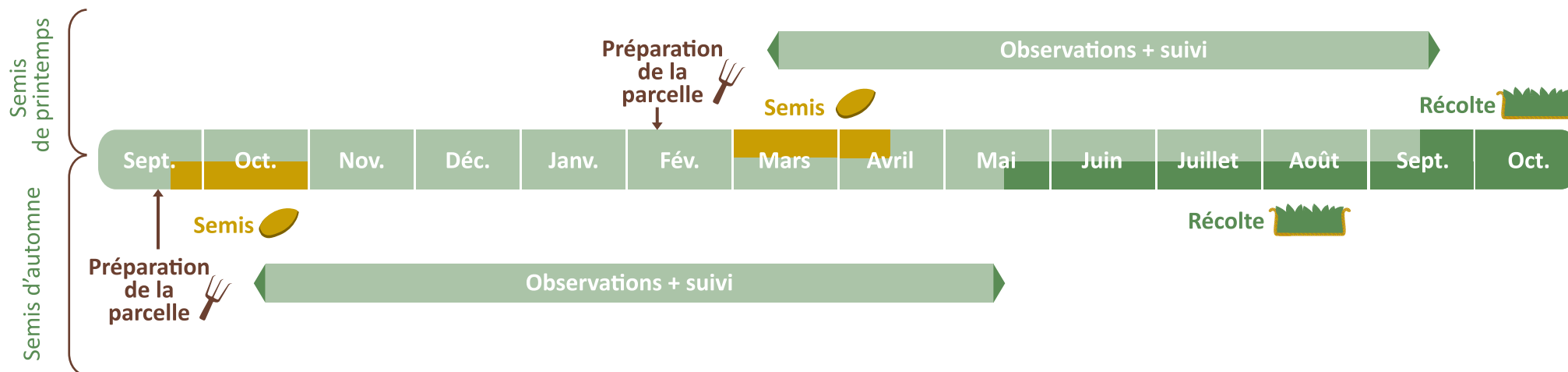
Le suivi se fait tout au long de la culture des *Noccaea*. Un passage par semaine est recommandé (voir ci-dessus, Quelques points d'attention pour réussir sa dépollution).

4. La récolte des plantes :

La récolte se déroule entre mi-mai et fin octobre, en fonction de l'état des plants. Pour les détails pratiques, voir chapitre III.2.4 page 39.

En cas de maladies ou si la floraison se généralise, la période de récolte peut être avancée.

Calendrier et déroulement :



B. La technique par repiquage

Matériel :

- Une mini-serre
- Plateau pour semis et éventuellement plaque alvéolée ou presse-motte
- Terreau (ph neutre)
- Graines

1. La production des plantules :

De mi-septembre à fin octobre (culture d'hiver) ou de mi-décembre à mi-janvier (culture d'été), à l'extérieur, en mini serre.

Semis en alvéoles, dans des mini-mottes ou dans de grands plateaux (voir chapitre III.1.4 page 29).

La mini-serre peut rester à l'extérieur, la plante supporte très bien le froid. La croissance est très lente au début et la plante reste petite pendant 2 à 3 mois (surtout en hiver).

2. La préparation des parcelles :

Bien anticiper le travail de préparation des parcelles qui peut fortement varier en fonction de leur état initial (voir chapitre III.1.2 page 25 pour la préparation de la parcelle, la technique du faux semis et la pose des toiles de paillage.

La dernière étape qui consiste à préparer le sol à accueillir les plantules se fera durant le mois qui précède le repiquage, soit dans le courant du mois de novembre, soit entre la mi-janvier à fin février, en dehors de toute période de gel et quand le sol n'est pas détrempé.

Au même moment, placer les barrières et les pièges anti-limaces.

3. Le repiquage :

Dès que les plants ont 6 à 8 feuilles et forment une petite rosette (de fin novembre à mi-janvier ou de début mars à mi-avril), repiquer à 10 x 10 cm d'écart en tous sens.

En dehors de toute période de gel.

4. Le suivi des cultures :

Le suivi se fait tout au long de la culture des Noccaea. **Un passage par semaine est recommandé** (voir ci-dessus, *Quelques points d'attention pour réussir sa dépollution*).

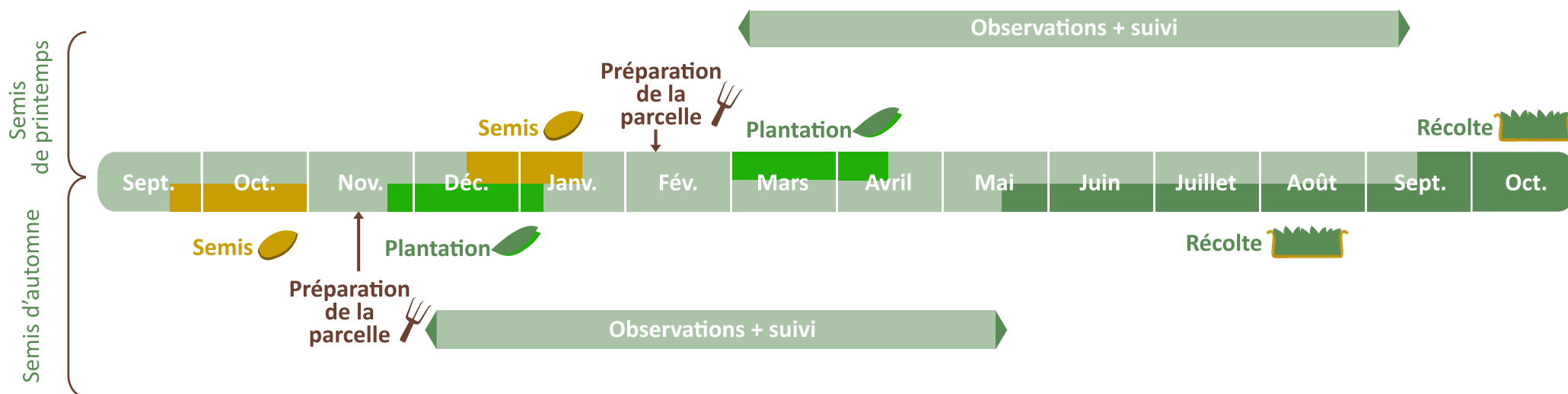
5. La récolte des plantes :

La récolte se déroule entre mi-mai et fin octobre, en fonction de l'état des plants. Pour les détails pratiques, voir chapitre III.1.4 page 31 pour la récolte.

En cas de maladies ou si la floraison se généralise, la période de récolte peut être avancée.

Calendrier et déroulement :

Cette technique comporte deux grandes étapes : la production des plantules et le repiquage dans les parcelles.



2. Itinéraire de culture pour la production de semences

Objectif :

Produire des plantes qui atteignent un développement important, fournissent un maximum de graines, si possible, en une saison de culture.

La culture se fera dans du terreau (substrat riche et léger). Elle débutera dès la fin de l'été par des semis en alvéole ou en barquette. Dès que les plants ont 6 à 8 feuilles, y compris les deux toute premières feuilles (cotylédons), ils sont repiqués dans de gros pots, ce qui leur permettra de poursuivre leur croissance et d'atteindre un développement suffisant avant la période de repos hivernal, période durant laquelle ils n'évoluent quasiment plus. La croissance reprend dès que les jours rallongent et une belle rosette de feuilles se développe. La floraison débute vers février-mars. Les graines pourront alors être récoltées durant l'été, une fois que les fruits seront mûrs et bien secs. Cependant, la plante pouvant être bisannuelle, il est possible qu'elle ne fleurisse pas, ou peu, la première année. Il faudra alors assurer le suivi de culture jusqu'à l'année suivante. Plusieurs facteurs, que nous n'avons pas encore identifiés avec certitude, déterminent ces comportements. Le semis peut néanmoins se faire directement dans les gros pots (voir technique du semis direct en pots). Il n'y a alors pas de repiquage.

Quelques points d'attention pour réussir sa production de semences :

- Le repiquage engendre un stress qui favorise le déclenchement de la floraison.
- Serrer les plantes au moment du repiquage (1 plante pour 10 x 10 cm) peut aussi être un facteur de stress qui favorise la floraison.
- La culture en pots facilite la récolte des graines, permet de déplacer les plantes en fonction des facteurs météorologiques...
- Un suivi régulier est indispensable pour ne pas rater la période de récolte !

Attention à :

- Placer les pots à l'abri de la pluie et du vent dès qu'il n'y a plus de fleurs.- Choisir le bon moment pour commencer la récolte : si l'on cueille trop tôt, beaucoup de fruits (et donc de graines) seront immatures et si l'on cueille trop tard, presque toutes les graines seront déjà tombées !
- Ne pas se précipiter au moment de la récolte car les fruits bien mûrs s'ouvrent au moindre contact, laissant échapper les graines.
- Ne pas arracher la plante avec ses racines, car les tiges florales et les graines ne doivent pas être mélangées à de la terre.

Côté pratique

Matériel :

- Une mini-serre
- Pots de 12 à 15 litres
- Bandes de cuivre autocollantes
- Terreau fertile (riche)
- Graines

1. Le semis :

- De mi-septembre à fin octobre, à l'extérieur, en mini-serre.
 - La mini-serre peut rester à l'extérieur, la plante supporte très bien le froid.
- La croissance est très lente au début et la plante reste petite pendant 2 à 3 mois.**

2. Le repiquage en gros pots :

- De fin novembre à mi-décembre, lorsque la majorité des plantes a formé de 6 à 8 feuilles, y compris les deux toutes premières feuilles (cotylédons).
- Repiquer 5 à 7 plantes par pot. Chaque pot est ceinturé d'une bande de cuivre (voir chapitre III.1.3 page 26 protection contre les ravageurs).
- Arroser abondamment après le repiquage et placer les pots en exposition ensoleillée.

Le semis peut également se faire directement dans les gros pots (voir technique du semis direct en pots). Il n'y a alors pas de repiquage.

3. Le suivi des cultures :

- L'arrosage :

La plante tolère bien la sécheresse, mais ne supporte pas l'excès d'humidité car elle est sensible aux maladies fongiques (dues aux champignons).

En cas de sécheresse (s'il ne pleut pas pendant plusieurs semaines) :

- Placer une coupelle sous les pots, arroser copieusement et attendre que le terreau s'humidifie
- Ne pas laisser la coupelle remplie d'eau plus d'une journée
- Renouveler l'arrosage chaque fois que le terreau a séché

En cas de météo pluvieuse :

- Éviter que le terreau ne reste humide en permanence
- Ne pas mettre de coupelle sous les pots
- Éventuellement placer les pots dans un endroit abrité (sous un toit...) si la pluie est quotidienne pendant plusieurs semaines.

- La lutte contre les herbivores :

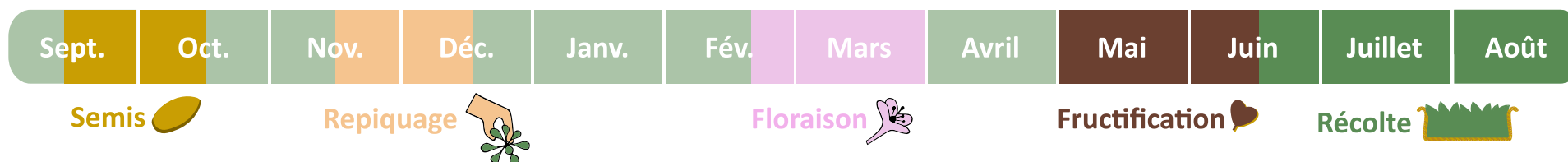
Avec la bande de cuivre autocollante, les plants sont peu soumis aux attaques de limaces et d'escargots. Une surveillance régulière permettra néanmoins d'intervenir dès que la moindre trace de prédation est observée. Il s'agira alors de repérer l'auteur des attaques et de le retirer du pot.

- Des observations régulières :

Une observation régulière est indispensable non seulement pour repérer les ravageurs éventuels, mais aussi pour ne pas rater la floraison ou, pire, la fructification et la période de récolte. Les premières fleurs peuvent apparaître dès **février-mars**. Petit-à-petit, la plante forme de hautes tiges sur lesquelles apparaissent, à partir du bas, des fleurs puis des petits fruits en forme de cœurs, en démarrant par le bas.

En cas de saison pluvieuse, pensez à protéger vos plantes de la pluie pour éviter de perdre toute la production de graines, par exemple en plaçant vos pots sous une véranda, en installant un petit toit... !

Calendrier et déroulement :



4. La récolte des graines

La récolte des graines se déroule de mi-mai à fin août, selon la météo et les conditions de culture. Pour les détails pratiques, voir chapitre III.1.4. page 30 pour la récolte.

Cette année : Les graines de tous les semenciers seront triées, tamisées et rassemblées par variété lors de la rencontre annuelle des semenciers. Les restes de plantes seront rassemblés et emportés par l'ULB.

L'année prochaine : Une fois la récolte terminée, les graines seront conservées dans un petit pot avec couvercle en n'oubliant pas de noter la variété et l'année de récolte. Les restes de plantes séchées issues du tamisage seront rassemblés dans une grande enveloppe et envoyés à l'ULB en même temps que les graines.

5. La suite des cultures

Les plantes pouvant être bisannuelles, observer ensuite si les plantes périssent après fructification ou si les rosettes de feuilles restent vertes.

- Si les plantes périssent : récolter le tout (pas les racines), faire sécher et stocker à part.
- Si les plantes restent vertes, cela signifie qu'elles vont refleurir l'année suivante. La culture continue donc jusqu'à la saison suivante :
 - Surveiller et arroser en cas de sécheresse
 - Retirer les feuilles mortes en automne et en hiver, les faire sécher et réserver pour le moment où les restes de culture seront envoyés à l'ULB
 - Eventuellement, repiquer en pleine terre pour faciliter le suivi de l'arrosage.
 - Reprendre le suivi de la floraison dès le début du printemps, comme l'année précédente.



IV. Comment cultiver les champignons mycorhiziens à arbuscules avec de la luzerne

IV. 1. Généralités

Les CMA peuvent être cultivés avec une grande diversité de plantes. Dans le cadre de CiDéSol, celle qui a montré les meilleurs résultats est la luzerne, tant au point de vue de son association avec les champignons qu'au point de vue de la dissipation des HAP du sol par cette association.

1. Conditions de culture / climat

La luzerne préfère les sols bien drainés et reste sensible aux sols gorgés d'eau, compactés ou piétinés. Elle peut se développer sur les sols modérément acides (pH 6) et peut supporter la chaleur estivale est la sécheresse modérée une fois son enracinement bien établi. Elle supporte aussi bien le froid hivernal lorsqu'elle est en dormance.



Culture de luzerne (copyright : <https://agriculture.ba-renbrug.fr/semis-de-la-luzerne-la-loupe>)

2. Emplacement des parcelles

L'emplacement des parcelles sera essentiellement déterminé par les besoins de dépollution. La plante peut s'accommoder d'un peu tous les milieux. Seules les zones où l'eau peut être retenue ne lui conviennent pas.

3. Préparation du sol

Les soins apportés lors de la préparation initiale du sol impactent de façon significative le travail de désherbage ultérieur. Suivant l'état de la parcelle avant le début de la culture, ce travail de préparation sera plus ou moins important mais mieux il est fait, moins il y aura de travail par la suite ! Dans tous les cas, il y a lieu d'éliminer au maximum les adventices et démarrer sur une parcelle propre. Il est évident que si l'on part d'une parcelle déjà cultivée, le travail est nettement moindre que si l'on part d'une pelouse ou d'une friche.

Aérer ensuite le sol à la grelinette, à la fourche et émietter avec un râteau ou autre outil à dents puis aplanir la terre.

Le semis et inoculation en CMA peuvent se faire juste après cette préparation du sol.

4. Semis et inoculation par les CMA

L'apport de CMA dans les sols se pratique une seule fois au moment du semis ou de la plantation. Une fois l'association mycorhizienne installée, la symbiose perdure le long du cycle de vie de l'hôte végétal.

Si l'on souhaite réinoculer un sol déjà végétalisé, une méthode consiste à creuser des trous tous les 20 cm jusqu'à la zone de racines actives et à proximité des racines pour y déposer l'inoculum mycorhizien, puis recouvrir de terre et arroser.

5. Besoin en eau et arrosage

Comme pour beaucoup de cultures, pour atteindre un bon taux de germination lors des semis, il est indispensable d'arroser abondamment la terre et de maintenir l'humidité jusqu'à l'apparition des cotylédons (les deux premières pseudo-feuilles de la plante). L'arrosage se fera après le semis. Après l'enracinement, qui peut très rapidement être conséquent, la plante tolère mieux une limitation en eau. Un arrosage régulier (journalier) peut s'avérer nécessaire en cas de sécheresse.

6. Sol et apport de nutriments

Il n'est pas nécessaire de fertiliser les plantes, un apport de compost à la sortie de l'hiver s'avère suffisant.

7. Gérer la compétition

Durant le stade juvénile (1 tiges, quelques feuilles développées (voir figure 11)), la plante est sensible à la compétition avec les adventices. Un désherbage régulier (hebdomadaire) sera donc nécessaire durant les premiers stades de croissance. Savoir reconnaître les plantules de luzerne pour ne pas les enlever est donc nécessaire (figure 11).

Par la suite, le fort recouvrement de la parcelle par la luzerne permet de limiter le désherbage.

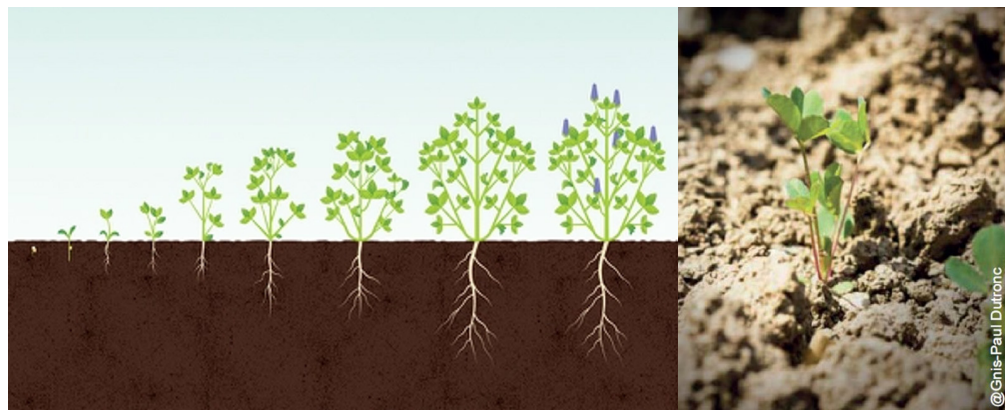


Figure 11: schéma du cycle de développement de la luzerne (gauche – Copyright: Patrick Richardson, <https://dribbble.com/shots/6430135-Alfalfa-Crop-Stages>) et plant de luzerne juvénile (droite – Copyright : Paul Dutronc, GNIS - <https://www.alliance-elevage.com/informations/article/la-luzerne-une-fourragere-riche-en-proteine>).

IV. 2 Itinéraires de culture

1. Produire son inoculum mycorhizien maison

Afin d'éviter toute compétition entre les CMA déjà présents au jardin avec d'autres, issus du commerce (parfois très cher) et afin d'éviter d'introduire une espèce potentiellement invasive qui peut perturber la microflore déjà présente, il est intéressant de produire son propre inoculum mycorhizien, provenant du jardin. Il a été suggéré que les CMA indigènes sont plus efficaces pour favoriser la croissance des plantes dans leur sol local que des espèces introduites.

Pour produire l'inoculum mycorhizien dans le jardin, il faut cultiver des plantes hautement mycotrophes comme la luzerne, le maïs, le plantain, le trèfle. Leurs graines sont facilement accessibles en jardinerie. Un mélange de plantes mycotrophes (maïs/trèfle par exemple) est préférable afin de 'piéger' (capter) une plus grande diversité de CMA dans le sol.

La production d'inoculum de CMA peut se faire en pot, en jardinière ou en bac, selon la surface à inoculer. La profondeur du pot ou du bac doit être au minimum de 20 cm. Le substrat est composé d'un substrat inerte amendé avec du terreau en faible quantité. En effet, un sol trop riche en éléments minéraux diminue la capacité des plantes et des CMA à s'associer, réduisant la quantité d'inoculum mycorhizien. Un substrat pauvre en nutriments stimule la production des CMA. Un amendement de 10% de terreau dans le substrat est suffisant pour apporter les nutriments à la plante sans affecter la croissance du champignon.

Parmi les **substrats** inertes, on trouve la ponce, la vermiculite, la perlite, le sable, la terre de lave, la tourbe. Il est important de penser aux impacts environnementaux globaux qu'engendre la production de ces différents substrats, à acheter donc avec parcimonie et privilégier les productions locales lorsque c'est possible.

A noter :

Dans le cadre du projet CIdéSol, nous avons choisi de produire les CMA sur un mélange :

- 45% du volume de sable fin
- 45% du volume de vermiculite
- 10% du volume de terreau

Des tests en laboratoire ont montré une bonne production d'arbuscules avec ce mélange par rapport à 20 et 30% de terreau dans le substrat.

Récolter son inoculum local :

L'inoculum local peut être prélevé dans une zone où l'on trouve des plantes mycotrophes (plantain, trèfle, graminées...). Il est préférable de collecter le sol dans des zones peu/pas cultivées car il doit contenir une population de champignons mycorhiziens diversifiée et saine qui n'a pas été affectée par les pratiques agricoles.

Il faut prélever le sol, en gardant les racines, sur 20 cm de profondeur environ. Le volume de sol à prélever correspondra à environ 1/3 du volume du pot ou du bac de production d'inoculum.

Mise en place de la culture :

Le pot ou le bac sera tout d'abord rempli d'un tiers du substrat mélangé, puis recouvert d'un tiers du sol préalablement récolté et enfin une dernière couche correspondant à un tiers du pot avec le substrat mélangé (figure 12).

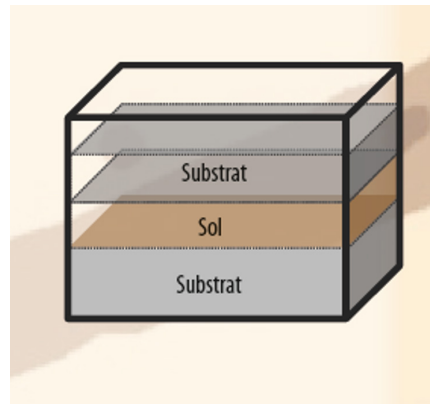


Figure 12. Schéma de production du bac avec les deux couches de substrat inertes entre lesquelles le sol prélevé sur le jardin a été déposé (source : Fiche technique INRA : Multiplier des champignons mycorhiziens sur son exploitation).

Le substrat est ensuite bien arrosé pour l'humidifier entièrement et les graines sont plantées ou semées à la volée selon les plantes. Par exemple pour les maïs, des trous de plantation de 3 cm de profondeur sont faits tous les 10 cm et une graine est déposée dans chaque trou. Pour la luzerne par exemple, les graines sont semées à la volée, à hauteur de 2 g par m². Un mélange de plante dans son pot/jardinière/bac est préférable afin d'espérer produire un inoculum avec beaucoup d'espèces de CMA.

L'entretien de l'inoculum est essentiel pour que les CMA se développent bien. Des adventices peuvent croître, il est nécessaire de les éliminer. L'arrosage est indispensable ! Le volume du substrat étant limité, l'accès à l'eau des plantes est réduit, il faut donc garder l'humidité dans le pot/bac constamment, sinon les plantes vont dépérir. Si l'hôte végétal dépérit, alors le champignon n'a plus d'apport en sucres et entre dans une phase de dormance, l'inoculum n'évolue plus.

Entretien de l'inoculum mycorhizien année après année

Peu avant les premières gelées, les plantes de luzerne peuvent être coupées à hauteur de 10 cm, afin d'aider la culture à repartir au printemps. Les maïs peuvent être coupés une fois que ceux-ci auront dépéri. Il est important de laisser les racines, porteuses des CMA, dans le bac, **donc ne pas arracher les plants**. Un apport de compost une fois l'hiver passé peut permettre de régénérer le substrat. Si un apport en nutriment est apporté, il faut faire attention d'amener peu de phosphore car un apport trop important en cet élément diminue la capacité des CMA à coloniser les plantes. Ajouter un peu de mélange du substrat au début du printemps avant de re-semer de nouvelles graines, de maïs par exemple, peut aussi permettre de régénérer les nutriments dans le bac.



2. Utiliser son inoculum pour inoculer sa parcelle à dépolluer

Récolte

Après 2-3 mois de culture avec des plantes bien établies sur le substrat, il est possible d'observer la présence des CMA dans les racines après coloration de celles-ci à l'encre (voir fiche technique).

Les parties aériennes des plantes peuvent alors être coupées et les racines récoltées. Attention, il n'est pas nécessaire de récolter toutes les racines du bac si celui-ci est grand. Pour certains CMA, les racines mycorhizées ne peuvent pas servir d'inoculum. Dans ce cas, seul le mycélium (hyphes et spores) du CMA peut servir d'inoculum. Afin de récolter le mycélium, il faut de retirer une motte de substrat contenant les racines et de secouer le substrat dans un seau, puis de couper les racines en petits morceaux à mélanger au substrat récolté (voir 'conditionner son inoculum' au point suivant).

Il faut compter environ 50 g de racines + substrats fraîchement récoltés par m² de sol à inoculer.

Si l'on veut stimuler la colonisation mycorhizienne, il est possible, 10 jours avant de prélever les racines, de couper les parties aériennes des plantes à la base de la tige et de stopper l'arrosage. Cela provoque un stress qui stimule le champignon à produire des spores et des vésicules.

Conditionner son inoculum

Les racines fraîchement récoltées sont coupées en fragments d'environ 0,5- 1 cm de long. Il n'est pas nécessaire de les nettoyer, les morceaux de terres collés aux racines contiennent des spores de CMA qui peuvent coloniser les plantes. Comme expliqué précédemment, ces fragments peuvent être mélangés à une partie du substrat pour servir d'inoculum ou alors il est possible d'utiliser les racines seules.

Utilisation pratique de son inoculum

L'inoculum mycorhizien peut également servir pour les cultures de vos fruits et légumes au potager, il va booster vos cultures. Pour cela, l'inoculum peut être ajouté dans les bacs/plaques de semis, mélangé avec le terreau de semis ou introduit dans les trous de plantation au moment du transfert au jardin (figure 13).

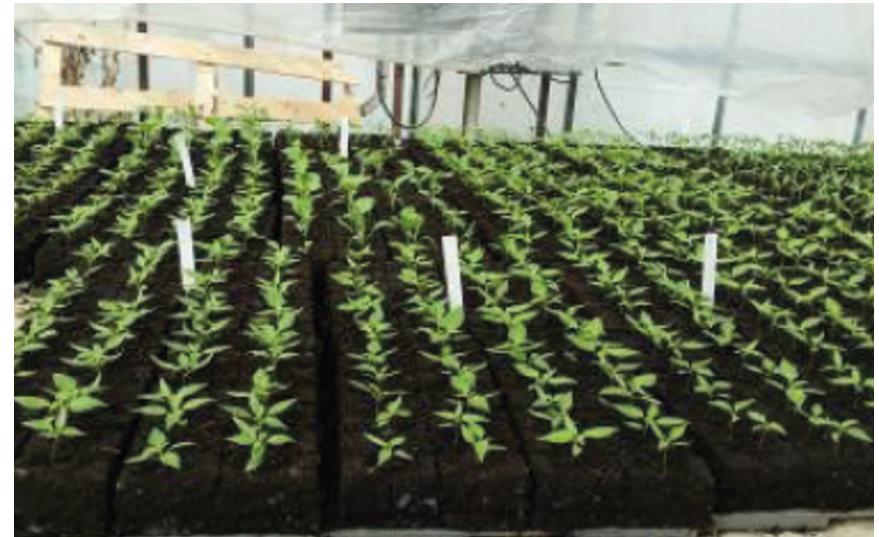


Figure 13. Inoculation du terreau de semis : des fragments de racines sont découpés et mélangés au terreau de semis.

3. Traiter les déchets issus de la culture pour dépolluer les sols contaminés par les HAPs

Les parties aériennes des plantes utilisées pour dépolluer le sol contiennent des HAPs. Par conséquent, il ne faut surtout pas les consommer ! Les déposer en compost n'est pas non plus une très bonne idée puisque les HAPs (et autres polluants comme les ETM) accumulés dans la plante et non dégradés vont retourner dans le sol et polluer la partie du sol sous le compost.

Des tests préliminaires de dégradation des HAP lors du processus de compostage ont été effectués lors de la dernière année de CiDéSol. Les résultats montrent une tendance à la dissipation des HAP lourds, mais une augmentation des HAP légers. Des expérimentations complémentaires sont nécessaires pour confirmer ou infirmer ces résultats et pour déterminer si un compostage plus long peut dissiper les HAP légers. Pour le moment, nous conseillons de jeter les parties aériennes des plantes récoltées dans les poubelles de déchets tout venant pour éviter tout risque de contamination du compost.

4. Culture de luzerne et inoculation aux CMA

Date de semis

Au printemps dès que le sol est bien réchauffé (avril-mai) ou avant mi- septembre, dès le retour des pluies, mais surtout bien avant le gel.

Semis et inoculation du sol avec l'inoculum mycorhizien

Avec une truelle, un transplantoir ou une serfouette, creuser des lignes sur 2 cm de profondeur, environ tous les 15 cm. Dans le fond de la ligne, disperser l'inoculum³³ mycorhizien le long de la ligne. Recouvrir de sol sur environ 0,5 cm et ensuite déposer les graines dans la ligne, à raison de 30 kg par ha, soit 3 g par m². La graine doit se trouver à environ 1 cm de la surface, pas en-des- sous de 2 cm. Bien recouvrir et tasser après le semis, voir passer un rouleau.

Entretien de la culture année après année

Une coupe à 10 cm de hauteur à l'entrée de l'hiver, avant les premières ge- lées, peut être réalisée afin d'aider la culture à repartir au printemps. Un ap- port de compost peut être aussi réalisé à la sortie de l'hiver.



V. Le mot de la fin

Ce guide pratique vise à mettre à disposition les informations produites et collectées lors des 3 années de recherche-participative du projet CiDéSol. Ce travail a été fait en parallèle à l'analyse des conditions et moyens nécessaires à l'appropriation des techniques de phytoremédiation par toute personne désireuse d'être un acteur de changement dans le domaine de la gestion de la pollution des sols.

Les co-chercheurs de CiDéSol ont montré que l'investissement nécessaire pour mener à bien ces cultures n'était pas négligeable, et que leurs motivations (qu'elles soient de l'ordre de l'intérêt scientifique ou de l'engagement socio- politique) pour mener à bien ce travail étaient très diverses et se combinent souvent.

Nous tenons à remercier tous les co-chercheurs de CiDéSol pour leur contribution à l'acquisition de ces connaissances et pour leurs apports à ce guide.

²⁸ Inoculum : échantillon contenant des parties vivantes qui sera inoculé. Ici, le CMA sera introduit près des racines pour coloniser la plante

PHYTOREMÉDIATION : SUIVI DES PARCELLES

Nom du Living Lab :

Commune :

Description des parcelles ou sous-parcelles :

Nom ou n° :

Dimension :

m x

m

Ensoleillement : Plein soleil

Mi-ombre

Ombre

Sol :

Particularités :

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Nom ou n° :

Dimension :

m x

m

Ensoleillement : Plein soleil

Mi-ombre

Ombre

Sol :

Particularités :

.....

.....

.....

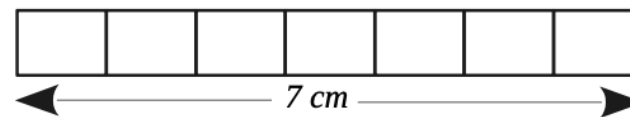
.....

.....

.....



Observations-actions réalisées



Lors de chaque visite, notez la date, cochez les bonnes cases et complétez la case « autres » si besoin.

Dates	Parcelle		Variété	Semis direct (lignes)	Repiquage	Début de germination	Prédation (%)	Rosette > 7 cm	1ères fleurs	Arrosage	Désherbage	Remplacement de plants	Coupe de fleurs	Autre (autres interventions, observations particulières...)	Récolte
	Gange	Lux													



Consignation des données

NOM, Prénom : Variété de *Noccaea* :



Semis

Repiquage

Floraison

Fructification

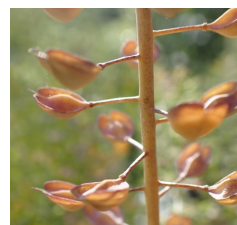
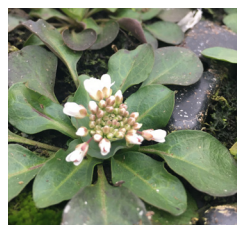
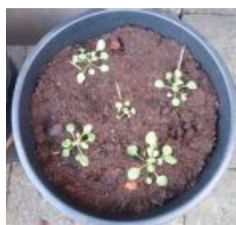
Récolte

Semis en alvéoles ou en barquette
à l'extérieur sous abri

Repiquage
en grands pots

Observations et suivi de l'arrosage et de dégâts de limaces et escargots

Récolte des graines
(hampes florales)



Description des parcelles ou sous-parcelles :

Dates :

- Semis :
- Germination :
- Repiquage en grands pots (Rep.) :
- Apparition des 1ères fleurs :
- Début de récolte des graines :
- Fin de récolte :

Observations sur les semis :

- Substrat :
- Types de semis : en alvéoles en petits pots
- en mini-mottes en bac/terrine à semis
- autre :
- Emplacement : en mini-serre en serre-froide
- autre :
- Ensoleillement : plein soleil mi-ombre ombre
- autre :

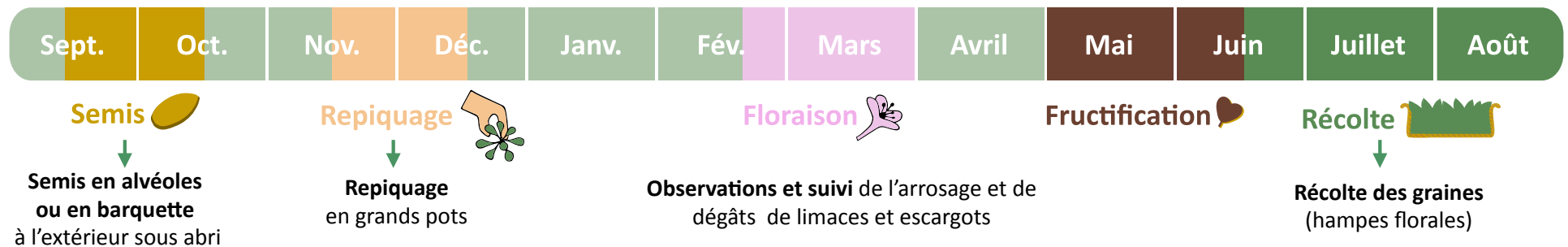
Comptages :

- Nombre de graines semées :
- Nombre de graines germées :
- Nombre de plants repiqués :
- Nombre de plants ayant dépéri avant floraison :
- Nombre de plants en fleurs :
- Nombre de plants vivants n'ayant pas fleuri du tout :
- Nombre de plants ayant survécu après fructification :
- Nombre de plants ayant dépéri après fructification :

Observations sur les plants repiqués :

- Emplacement :
- Orientation :
- Episode météorologique particulier (+ dates) :
-
- Autres :





Conseils de culture

Dates :

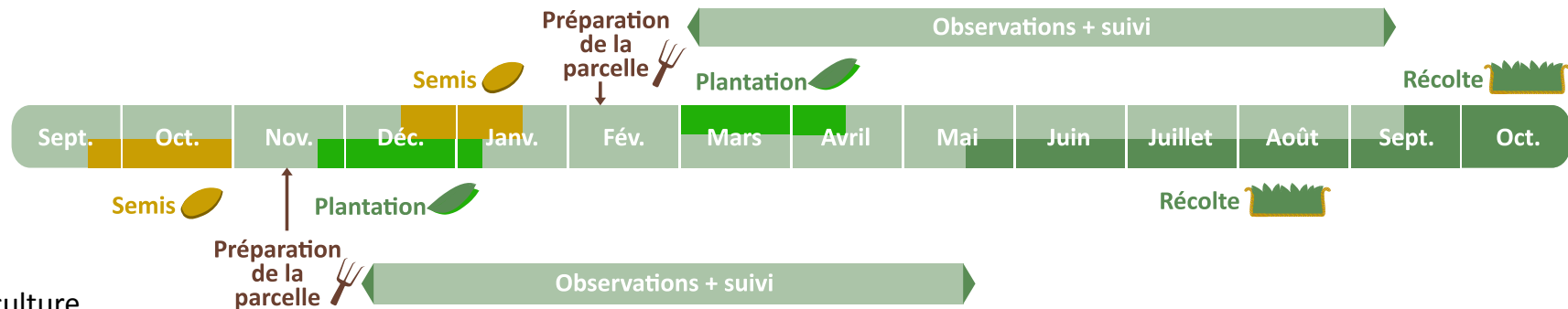
- En septembre-octobre, directement à l'extérieur.
- Remplir les alvéoles ou la barquette de terreau universel, puis arroser abondamment (le terreau doit être détrempe).
- Semer en surface, tasser légèrement, ne pas recouvrir de terreau.
- Placer un couvercle transparent (ex.: mini-serre) pour garder l'humidité.
- ⚠ Attention aux attaques de mollusques (limaces, escargots) : placer les semis en hauteur.
- Germination en 1 à 3 semaines

Repiquage :

- Dès que les plants ont 6-8 feuilles et forment une petite rosette.
- Dans des pots grands et profonds de 10 à 15 L; 5-6 plants par pot.
- Dans un terreau universel (substrat riche et léger : les *Noccaea* n'aiment pas les sols lourds ou tassés).
- Protéger des mollusques en collant une bande adhésive de cuivre sur tout le pourtour extérieur des pots. - Placer en plein soleil ou à la mi-ombre.
- En cas de sécheresse prolongée : arroser; prévoir éventuellement une soucoupe.
- En cas d'épisode pluvieux prolongé : placer à l'abri afin d'éviter que le terreau ne soit détrempe.

Récolte :

- Quand les fleurs fanent, de petits fruits en forme de cœur apparaissent et grossissent petit-à-petit du bas vers le haut de la hampe florale.
- Récolter lorsque les fruits sont mûrs : ils sont alors beige-jaunâtre et secs, et s'ouvrent quand on les touche.
- Couper les hampes florales au fur et mesure qu'elles jaunissent; ne pas arracher le plant avec ses racines.
- ⚠ Attention : En cas de pluie ou vent, placer sous abri pour éviter que les fruits ne s'ouvrent et que les graines ne tombent au sol.



Conseils de culture

Semis = préparation des plants :

- En septembre-octobre ou en décembre
- En alvéoles, en mini-mottes ou dans un plateau, à l'extérieur sous abri
- Tasser le terreau et arroser abondamment : le terreau doit être détrempé
- Semer en surface, une graine par alvéole ou par mini-motte : déposer une graine sur le terreau et appuyer légèrement avec le doigt, ne pas recouvrir de terreau
- Placer dans une mini-serre ou couvrir d'un couvercle transparent pour garder l'humidité pendant la phase de germination (celle-ci prend de 1 à 3 semaines)
- Placer à l'extérieur

Préparation de la parcelle, à débiter en même temps que les semis :

- Désherber et aérer la terre
- Placer des protections anti-limaces (voir fascicule)
- Retirer les limaces et escargots visibles, placer des pièges anti-limaces et vérifier pendant quelques semaines, jusqu'à ce qu'on ne capture plus aucune limace ou escargot
- Refaire un désherbage juste avant repiquage

Plantation = repiquage en pleine terre :

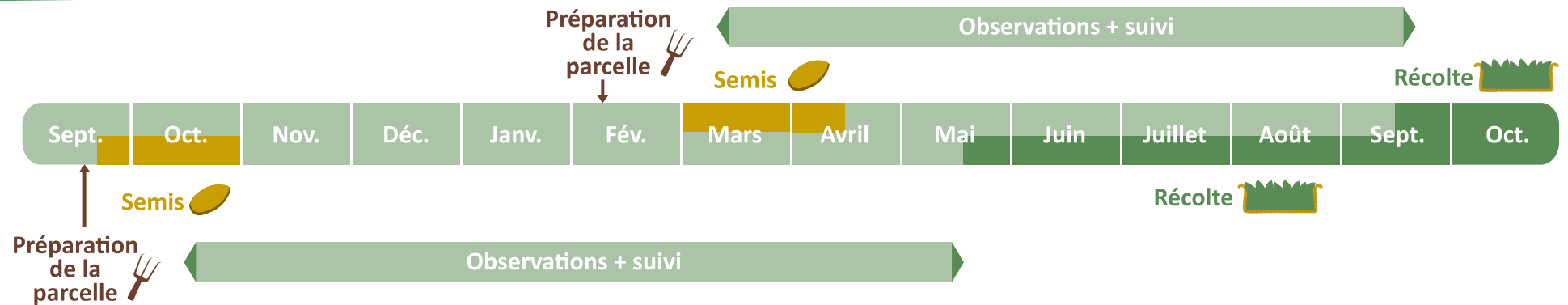
- Dès que les plants ont 6 à 8 feuilles et forment une petite rosette
- En dehors de toute période de gel
- En pleine terre, à 10 x 10 cm d'écart en tous sens
- Faire de petits trous dans la terre, insérer un plant par trou, refermer sans enterrer les feuilles et sans tasser
- Arroser

Observations + suivi de la parcelle

- En cas de sécheresse (aucune pluie depuis 3 semaines) : arroser à raison de 5 à 10 l par m² et par semaine, jusqu'au retour de la pluie
- En cas de dégâts de limaces et escargots : retirer les organismes visibles, placer et relever des pièges anti-limaces jusqu'à ce qu'on ne capture plus aucune limace ou escargot
- Couper les hampes florales dès qu'elles apparaissent pour limiter la floraison qui entrave la dépollution

Récolte :

- Récolter les rosettes quand elles atteignent 15-20 cm de diamètre en coupant la racine juste sous la rosette, rincer et faire sécher
- Laisser les racines en terre
- Par ailleurs, procéder également à la récolte si les plants flétrissent alors que le sol est humide ou si la floraison se généralise



Conseils de culture

Préparation de la parcelle, à débiter 2 à 3 semaines avant les semis :

Préparation de la parcelle, à débiter 2 à 3 semaines avant les semis :

- Désherber et aérer la terre
- Placer des protections anti-limaces (voir fascicule)
- Retirer les limaces et escargots visibles puis placer des pièges anti-limaces et vérifier pendant quelques semaines, jusqu'à ce qu'on ne capture plus aucune limace ou escargot
- Refaire un désherbage juste avant le semis

Semis direct, en pleine terre :

- Fin septembre/octobre ou mars
- Arroser abondamment la parcelle préparée : la terre doit être détrempée pour permettre la germination
- Creuser des sillons d'1 cm de profondeur tous les 10 cm, semer en surface, 2-3 graines tous les 5 cm, ne pas recouvrir de terre
- Couvrir d'un voile d'hivernage pendant 2 à 3 semaines pour garder l'humidité ou arroser en fine pluie jusqu'à la germination par temps sec (la terre doit rester détrempée pendant toute la phase de germination)
- Les graines germent en 1 à 3 semaines

Préparation de la parcelle, à débiter 2 à 3 semaines avant les semis :

- En cas de sécheresse (aucune pluie depuis 3 semaines) : arroser à raison de 5 à 10 l par m² et par semaine, jusqu'au retour de la pluie
- En cas de dégâts de limaces et escargots : retirer les organismes visibles, placer et relever des pièges anti-limaces jusqu'à ce qu'on ne capture plus aucune limace ou escargot
- Couper les hampes florales dès qu'elles apparaissent pour limiter la floraison qui entrave la dépollution

Récolte (R) :

- Récolter les rosettes lorsqu'elles atteignent 15-20 cm de diamètre en coupant la racine juste sous la rosette, rincer et faire sécher
- Laisser les racines en terre
- Par ailleurs, procéder également à la récolte si les plants flétrissent alors que le sol est humide, ou si la floraison se généralise

Préparation de la parcelle



Préparation de la terre



Barrière anti-limaces



Semis en lignes,
sillons espacés de 10cm



Début de germination

Préparation de plants et repiquage



Plants à repiquer



Repiquage

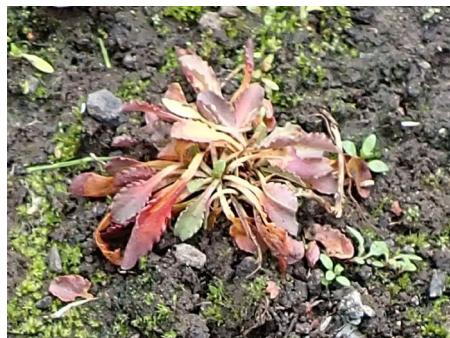
Problèmes divers



Prédation
par des mollusques



Floraison précoce



Dépérissement

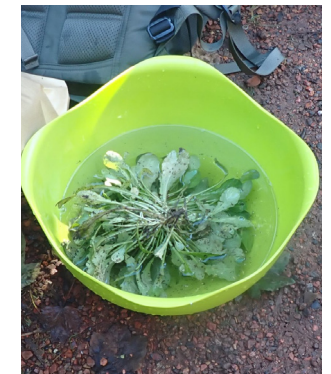
Récolte et nettoyage



Plants prêts pour la récolte



Récolte



Nettoyage





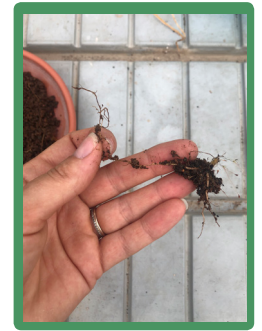
Après 2-3 mois de culture en bac, couper les parties aériennes des plantes sur la partie qui sera prélevée 10 jours avant récolte des racines



Avec une truelle, récolter les racines dans le substrat



Déposer le substrat dans une coupelle ou une assiette et y chercher les racines



Garder un peu de substrat riche en spores qui était proche/ collé aux racines

Le reste de substrat/ inoculum pourra être remis dans le bac pour y re-semer des graines de maïs, luzerne ou poireau, ail...



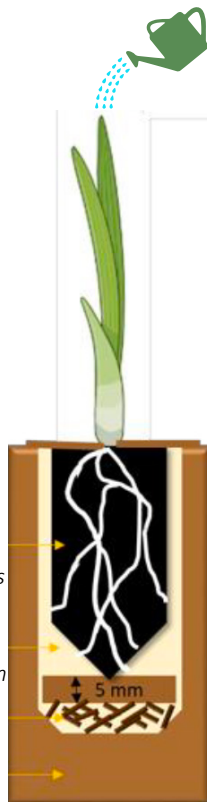
Couper les racines en fragments de 0,5 mm + mélanger avec le substrat gardé

Racines + substrat = inoculum

Plantation de mottes de terre avec plantules, plants à racines nues ou bulbes

Ex: motte de poireau, motte de potiron, bulbes...

- Désherber et préparer la surface de culture
- Creuser des trous de plantation de la hauteur de la motte + 0,5 cm
- Déposer 1 g d'inoculum dans le trou de plantation
- Recouvrir de 5 mm de sol
- Déposer la motte ou le bulbe dans le trou de plantation
- Recouvrir les mottes avec le sol
- Arroser et maintenir une humidité suffisante jusqu'à enracinement des plantes



Semis de graines ou bulbes en ligne

Ex: luzerne, blé, maïs, bulbe d'oignon...

- Désherber et préparer la surface de culture
- Creuser un sillon de 3-4 cm de profondeur
- Répartir 50 g d'inoculum le long du sillon (pour 1 m de long du sillon)
- Recouvrir de 5 mm de sol
- Répartir les graines ou les bulbes le long du sillon, selon les quantités prévues par le fournisseur (selon la plante)
- Recouvrir les graines ou les bulbes avec le sol
- Arroser et maintenir une humidité suffisante jusqu'à germination des graines ou des bulbes



Il est possible d'ajouter l'inoculum dans le substrat des plaques de semis (1 g par puits), avant d'ajouter la graine ou le bulbe => cela permet une mycorhization plus rapide avant un transfert de la motte sur la parcelle



Protocole d'arrachage des racines du bac pour coloration et observation des champignons mycorhiziens à arbuscules

- 1 Avec des ciseaux, ou un sécateur, couper les tiges et parties aériennes des plantes sur un carré d'environ 10 cm de côté (sélectionner un carré à environ 20 cm du bord).



- 2 Avec une petite truelle, carotter le substrat sur environ 15 cm de profondeur sur ce carré de 10 cm de côté. Les racines seront coupées.



Protocole d'arrachage des racines du bac
pour coloration et observation des champignons mycorhiziens à arbuscules

- 3 Déposer la carotte de substrat contenant les racines dans une coupelle, une assiette, un seau ou autre contenant et y chercher les racines (vous en aurez bien plus qu'ici pour cet exemple).



- 4 Il est possible de remettre ensuite le substrat dans le trou laissé dans le bac et y re-semer des graines de luzerne, de plantain ou de maïs



Protocole d'arrachage des racines du bac
pour coloration et observation des champignons mycorhiziens à arbuscules

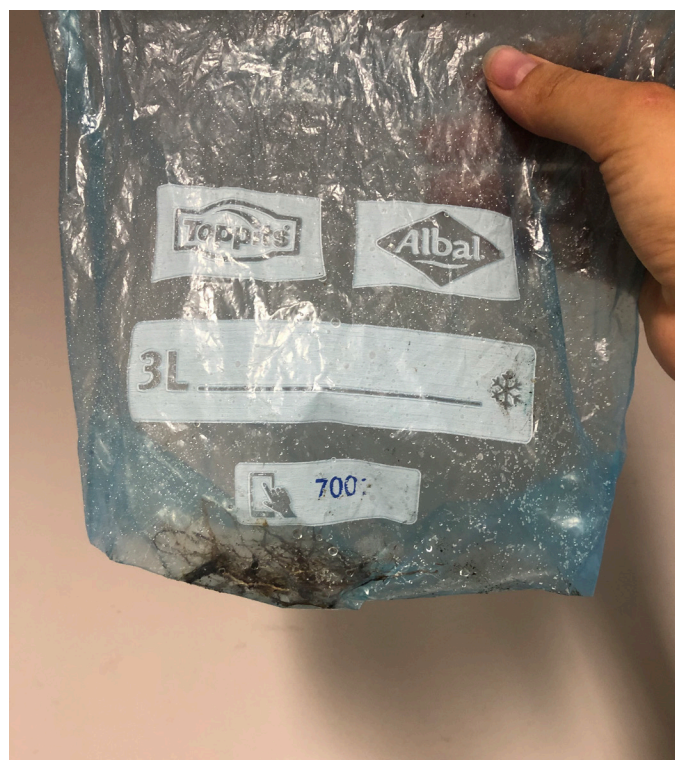
5 Nettoyer les racines à l'eau



6 Bien sécher les racines avec un papier type Sopalin



7 Les conserver dans un sachet au frigo jusqu'à la journée coloration.
Dans l'idéal, faire ce prélèvement la veille, mais sinon, entre 2 et 6 jours avant, maximum.



Protocole de coloration du champignon mycorhizien à arbuscules dans les racines

Pour toutes les étapes de cette coloration, porter des gants !

1 Préparer les solutions qui vont permettre la coloration:

Solution 1 : Dans un grand verre (bol, bouteille coupée...), verser 10 g de cristaux de soude (NaHCO_3) dans 100 ml d'eau du robinet

Solution 2 : Dans un grand verre (ou autre), diluer 50 ml (50g) de vinaigre (à 15°C) avec 100 ml (100 g) d'eau du robinet (pour atteindre une concentration à 5°C)

Solution 3 : Dans un grand verre (ou autre), verser 2 ml (2 g) d'encre dans 100 ml (100 g) de solution de vinaigre-eau du robinet

2 Mettre les racines nettoyées à l'eau (voir fiche technique sur l'arrachage des racines dans le bac) dans un contenant (tube/ pot en plastique, tasse...) et **ajouter la solution 1** de soude jusqu'à recouvrir les racines

3 Mettre les racines dans un four à **70°C pendant 2h** (si ce n'est pas possible de chauffer, laisser les racines dans la soude pendant la nuit à température ambiante)

4 **Rincer** les racines à l'eau du robinet

5 Mettre les racines dans la solution 2 (jusqu'à recouvrir les racines) dans le contenant pendant **10 min à température ambiante**

6 Enlever la solution vinaigrée et remplacer par **la solution d'encre** (jusqu'à recouvrir les racines)

1 Mettre les racines au four à **70°C pendant 30-45 min max.** (si ce n'est pas possible de chauffer, laisser les racines dans l'encre pendant la nuit à température ambiante)

2 **Rincer** et laisser baigner les racines dans l'eau jusqu'à observation des racines à la loupe ou au microscope (max. 5 jours, ensuite les racines pourrissent)

