

---

## **Cas d'étude de la dynamique d'une toiture verte extensive en climat méditerranéen : Etude de la végétation, banque de graines et composition chimique du sol**

**Auteur :** Poumay, Inès

**Promoteur(s) :** Mahy, Grégory; 17580

**Faculté :** Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

**Diplôme :** Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2021-2022

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/16225>

---

*Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

**CAS D'ETUDE DE LA DYAMIQUE D'UNE TOITURE  
VERTE EXTENSIVE EN CLIMAT  
MEDITERRANNEEN : ETUDE DE LA VEGETATION,  
BANQUE DE GRAINES ET COMPOSITION  
CHIMIQUE DU SOL**

**Inès POUMAY**

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORETS ET ESPACES NATURELS**

**ANNEE ACADEMIQUE 2021-2022**

**CO-PROMOTEURS : Thierry DUTOIT & Grégory MAHY**

*© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.  
Le présent document n'engage que son auteur.*

**CAS D'ETUDE DE LA DYAMIQUE D'UNE TOITURE  
VERTE EXTENSIVE EN CLIMAT  
MEDITERRANNEEN : ETUDE DE LA VEGETATION,  
BANQUE DE GRAINES ET COMPOSITION  
CHIMIQUE DU SOL**

**Inès POUMAY**

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORETS ET ESPACES NATURELS**

**ANNEE ACADEMIQUE 2021-2022**

**CO-PROMOTEURS : Thierry DUTOIT & Grégory MAHY**

## Remerciements

J'aimerais remercier l'ensemble des personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce TFE avec une attention particulière pour mes co-promoteurs : Grégory Mahy et Thierry Dutoit.

Je remercie Grégory Mahy pour sa bienveillance, ses nombreux conseils et sa bonne humeur tout au long du parcours. Vous avez été comme un coach pour moi et c'est exactement ce qu'il me fallait. Quel plaisir d'avoir pu travailler à vos côtés.

Merci à Thierry Dutoit pour son accueil au sein de l'IUT, l'aide de son équipe sur place pour les relevés botaniques ainsi que les expériences et visites réalisées lors de ce séjour à Avignon. J'en profite pour remercier à nouveau l'équipe de l'IUT avec en particulier Elise Buisson, Christel Vidaller et Hervé Ramone pour leur aide ponctuelle.

Merci également à Lucie Rivière qui a pu m'aider dans les démarches statistiques, ses précieux conseils ainsi que de s'être rendue disponible à de nombreuses reprises. J'ai pu reprendre confiance dans le processus et cela a été un réel boost d'avoir pu compter sur son aide.

Je remercie également les doctorants de l'IUT ainsi que les stagiaires avec qui j'ai lié des amitiés au cours de cette expérience en France. Tout comme les doctorants belges que j'ai pu rejoindre lors de mon retour en Belgique. Les quelques expériences à l'étrangers réalisés dans le cadre de ces études m'ont prouvé à quel point le voyage est une composante importante de mon épanouissement personnel et je remercie l'université de nous permettre de vivre de telles expériences enrichissantes.

Merci aux Professeurs gembloutois et aux assistants pour l'enseignement de qualité prodigué. Certains d'entre vous ont représentés de réels modèles et figures inspirantes au cours de ce parcours. L'impact que vous pouvez avoir sur notre développement est non négligeable.

Je remercie ma famille pour son soutien lors de ces six dernières années ainsi que Guillaume pour son sens du pratique et de l'organisation, son aide et son soutien sans faille.

Un dernier merci et non des moindres à mes co-kotteurs.euses et ami.e.s gembloutois.es sans qui ces années n'auraient pas eu la même saveur ! Avec qui des peines comme des joies ont été partagées, des soirées de déconnes et d'entraides, sur le chemin de l'âge adulte et de ses responsabilités que nous avons tous traversées. Merci à eux d'avoir rendu cette expérience si unique et mémorable.

## Résumé

La présente étude porte sur une expérimentation de toiture verte extensive non irriguée, non gérée et soumise au climat méditerranéen. Afin d'assurer au mieux la réussite cette toiture verte, l'hypothèse de l'habitat analogue a été faite avec pour modèle les végétations des encroutements biologiques (tonsure) de la steppe de La Crau. Des transferts d'inocula provenant de cet habitat ont été réalisés lors de la mise en place de cette toiture en 2016. Les combinaisons des modalités de trois facteurs ont été testées à travers 96 unités expérimentales (UE) d'1mx1m. Il s'agit de : la profondeur du substrat (5 ou 15 cm), l'inoculation (apport ou non d'inoculum) et le type de substrat (peu, moyennement ou très drainant). L'évaluation du succès de ces conditions s'est faite à travers trois compartiments d'étude interconnectés : la végétation de la toiture, sa banque de graines et les paramètres chimiques du substrat. L'expérience a montré que la richesse spécifique et le recouvrement végétatif de la toiture ont globalement évolués positivement au cours du temps. L'inoculation permet d'augmenter le recouvrement végétatif dans le cas où les UE ont 15 cm de profondeur, même 6 ans après la mise en place de la toiture verte. Cependant, cet apport initial de graines ne permet pas significativement de distinguer les recouvrements moyens des UE de 5 cm de profondeur. Une augmentation de la part d'espèces spontanées est observée au cours du temps bien qu'elle reste toujours proportionnellement moins importante que celle des espèces typiques potentielles de l'inoculum. En cas de perturbation de cette végétation, la banque de graines ne permettrait pas de reconstituer les communautés végétales actuellement en place car elle est principalement composée d'espèces spontanées. Entre 2016 et 2022, les concentrations en carbone et azote des substrats ont augmentés de façons significatives. D'avantage d'investigations en termes de relation sol-plantes ainsi que sur l'impact des variations interannuelles des précipitations devrait être réalisées dans les études dynamiques des communautés végétales de ces toitures. Les espèces typiques des tondures sur la toiture sont principalement annuelles et leur cycle complet de fructification est compromis en cas de sécheresse prolongée. L'installation de structures pourvoyeuses d'ombrage, le choix d'espèces pérennes (ex : géophytes), ou encore l'irrigation permettraient de diminuer ces menaces et d'assurer la pérennité de la toiture verte bien que cette dernière ait déjà prouvé sa résilience depuis sa mise en place.

Mots-clés : *toiture verte extensive, habitat analogue, climat méditerranéen, banque de graines, substrat.*

## Abstract

The present study deals with an experimentation of an extensive non-irrigated nor managed green roof under the Mediterranean climate. In order to ensure the success of this green roof, the template habitat theory was used by choosing the vegetation of the biological crust (tonsures) of the La Crau as the model habitat. Transfers of inocula from this habitat were made during the implementation of this roof in 2016. Modality combinations of three factors were tested across 96 experimental units (EU) of 1mx1m. These were: substrate depth (5 or 15 cm), inoculation (inoculum supply or not), and substrate type (poorly, moderately, or highly draining). The success of these conditions was evaluated through three interconnected study compartments: the roof vegetation, its seed bank and the chemical parameters of the substrate. The experiment showed that the species richness and vegetative cover of the roof evolved positively overall over time. The inoculation allows to increase the vegetative cover in the case that the EU are 15 cm deep, even 6 years after the installation of the green roof. However, this initial seed supply does not significantly distinguish the average cover of 5 cm deep EUs. An increase in the share of spontaneous species is observed over time although it still remains proportionally lower than that the species from the potential typical inoculum. If this vegetation were disturbed, the seed bank would not be able to replenish the plant communities currently in place because it is mainly composed of spontaneous species. From 2016 to 2022, the carbon and nitrogen concentrations of the substrates increased significantly. Further investigations in terms of soil-plants relationships as well as the impact of interannual variations in precipitation should be carried out in dynamic studies of the plant communities on these green roofs. The typical tonsures' species found on the rooftop are mainly annuals and their full fruiting cycle is compromised under prolonged drought conditions. The installation of shade-providing structures, the choice of perennial species (e.g. geophytes), or irrigation could reduce these threats and ensure the sustainability of the green roof, even though this green roof have already proven its resilience since its implementation.

Key words: extensive *green roof*, *habitat template*, *Mediterranean climate*, *seed banks*, *substrate*.

## Table des matières

<b>1 - INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
1.1. Les toitures vertes .....	6
1.1.1. Définitions .....	6
1.1.2. Structure.....	7
1.1.3. Substrats et compositions physico-chimiques .....	7
1.1.4. Choix de la végétation .....	8
1.2. L’habitat analogue.....	8
1.2.1. Définition .....	8
1.2.2. Les végétations de la plaine de La Crau : un modèle pour construire des TV analogues en climat méditerranéen ? .....	9
1.2.3. Inoculation.....	10
1.3. La banque de graines.....	10
1.3.1. Définition .....	10
1.3.2. Typologie .....	10
1.3.3. Etude de la banque de graines .....	11
1.4. La dynamique des communautés végétales .....	11
1.4.1. De la banque de graines à la communauté végétale .....	11
1.4.2. La théorie des filtres et communautés végétales sur les TV .....	12
1.5. Objectif et questions de recherches.....	13
1.5.1. La végétation .....	13
1.5.2. La banque de graines.....	13
1.5.3. Le substrat .....	13
<b>2 - MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>14</b>
2.1. Lieu d’étude.....	14
2.2. Design de l’expérimentation .....	14
2.3. Collecte des données.....	17
2.3.1. Végétation .....	17
2.3.2. Banque de graines de la TV .....	18
2.3.3. Substrats.....	19
2.4. Analyses des données .....	19
2.4.1. Végétation .....	19
2.4.2. Banque de graines .....	20
2.4.3. Substrats.....	21



<b>3 - RESULTATS .....</b>	<b>22</b>
3.1. Végétation .....	22
3.1.1. L'évolution du couvert végétal du TVext.....	22
3.1.2. L'évolution de la richesse spécifique du TVext .....	24
3.1.3. Evolution temporelle de la composition floristique globale du TVext.....	25
3.1.4. Evolution temporelle de la composition floristique globale en fonction des facteurs étudiés .....	27
3.1.5. Structuration finale (2022) de la composition floristique en fonction des facteurs étudiés ..	30
3.1.6. Ressemblances des communautés végétales de la TVext, des pelouses environnantes et des tonsures de Crau .....	32
3.2. Banque de graines.....	33
3.3. Substrat .....	37
<b>4 – DISCUSSION .....</b>	<b>39</b>
4.1. Discussion générale.....	39
4.2. Retour sur expérience et perspectives.....	41
4.3. Implications à la mise en œuvre des TVext.....	42
<b>5 – CONCLUSION .....</b>	<b>43</b>
<b>6 – CONTRIBUTION PERSONNELLE .....</b>	<b>43</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>44</b>
<b>ANNEXE – Poster scientifique présenté au colloque EcoVeg15 (mai 2022) .....</b>	<b>49</b>

## Liste des figures

<i>Figure 1: Schéma synthétique de la toiture verte étudiée avec ces 3 compartiments : végétation, banque de graines et substrat ; ainsi que ses inputs : inocula de Crau et pluie de gaines.</i>	6
<i>Figure 2: Organisation classique d'un toit vert (TV).</i>	7
<i>Figure 3: Limites approximatives de la plaine de La Crau.</i>	9
<i>Figure 4: Photo de la steppe de la Crau.</i>	10
<i>Figure 5: Photo d'une tonsure.</i>	10
<i>Figure 6: Schéma de l'unité expérimentale générale.</i>	14
<i>Figure 7: Diagramme expérimental du toit vert.</i>	15
<i>Figure 8 : Schéma du design expérimental du toit vert.</i>	16
<i>Figure 9 : Photos du design expérimental du toit vert.</i>	16
<i>Figure 10 : Photos du design expérimental du toit vert.</i>	16
<i>Figure 11: Illustrations de la récolte à l'identification des espèces de la banque de graines.</i>	18
<i>Figure 12 : Box plot des pourcentages de recouvrement de la végétation en fonction des différentes modalités de l'interaction des facteurs "inoculum" et "profondeur" en 2022.</i>	24
<i>Figure 13: Schéma des indices de similarités de Jaccard entre les 3 années d'études de la végétation sur la TV.</i>	25
<i>Figure 14 a: Histogramme du pourcentage de recouvrement moyen par espèces sur le TVext en 2016, 2018 et 2022. Espèces spontanées.</i>	26
<i>Figure 15 : PCoA des relevés de végétation du TVext de 2016, 2018 et 2022.</i>	29
<i>Figure 16 : PCoA des relevés de végétation du TVext de 2022.</i>	31
<i>Figure 17 : Schéma des systèmes étudiés et de leurs ressemblances calculées via l'indice de similarité de Jaccard.</i>	32
<i>Figure 18 : Histogramme de la densité de graines de la BG permanente du TVext en 2022 et du pourcentage de recouvrement moyen par espèces sur le TVext en 2022.</i>	35
<i>Figure 19 : ACP des paramètres chimiques des substrats pour les années 2016, 2018 et 2022 et les ellipses correspondantes aux années étudiées (IC de 95%).</i>	37

## Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Les quadrats concernés par les analyses faites sur la végétation, le substrat et la banque de graines.</i>	
.....	17
<i>Tableau 2: Pourcentage de recouvrement végétatif moyen et pourcentage de quadrats sans recouvrement végétatif en 2016, 2018 et 2022 sur le TVext (Toit Vert extensif).</i>	22
<i>Tableau 3a : Résultats de l'analyse de variance à 3 facteurs (profondeur, inoculum, granulométrie) vis-à-vis du pourcentage moyen de couvert végétal par quadrat en 2016.</i>	22
<i>Tableau 4 : Moyennes et écart-types des pourcentages de recouvrement végétatif moyen des modalités des facteurs qui étaient significatifs pour 2016 et 2022.</i>	23
<i>Tableau 5 : Moyennes et écart-types du nombre d'espèces moyen par quadrat en 2016 et 2022 en fonction des modalités des facteurs étudiés (profondeur, inoculum, granulométrie).</i>	24
<i>Tableau 6 : Évolution des concentrations des paramètres chimiques des substrats entre 2016 et 2022.</i>	38

## 1 - INTRODUCTION

Les toitures vertes (TV) apportent de nombreux avantages pour les villes qui en possèdent (Vijayaraghavan 2016). On peut par exemple citer leur rôle intéressant d'isolation thermique des bâtiments sous-jacents (Azeñas et al. 2018), leur effet sur le phénomène d'îlot thermique urbain (Bevilacqua et al. 2016; 2017), tous deux modulés par le type d'espèces végétales en place sur les toitures vertes (Cameron, Taylor, et Emmett 2014). Ces toitures permettraient d'augmenter la biodiversité urbaine (Madre et al. 2014; Williams, Lundholm, et Scott MacIvor 2014; Wooster et al. 2022) et auraient un effet d'autant plus important que les toitures seraient diversifiées en termes d'espèces végétales (Gonsalves et al. 2022) et/ou intégrées dans une logique de connectivité (Braaker et al. 2017) ou encore de réseau écologique (Froment 2017; Joshi et al. 2021). Elles seraient aussi capables d'améliorer la qualité de l'air de leur environnement proche (Arbid, Richard, et Sleiman 2021).

Les nombreux bénéfices qu'apportent ces toitures végétalisées éveillent donc la curiosité des scientifiques. En 2012, des recherches sur les toitures vertes avaient été réalisées dans 31 pays différents et le nombre d'articles lié à la thématique sur WebOfScience n'a cessé d'augmenter depuis les années 1990 (en passant de 4 articles à 74 articles de recherches en 2012) (Blank et al. 2013). Cependant, leur mise en place et leur maintien peuvent s'avérer compliqué en fonction des contraintes qui leur sont imposées. Les profondeurs et types de substrats (Dusza et al. 2017; Papafotiou et al. 2013), le niveau d'ensoleillement (Chenot 2018; Brown et Lundholm 2015), le climat (Thuring et Grant 2016), la sécheresse et la disponibilité en nutriments du sol (Vannucchi et al. 2022), l'irrigation (Chowdhury et Abaya 2018; Nagase et Dunnett 2010; Van Mechelen, Dutoit, et Hermy 2015) et la maintenance (Pittaluga, Schenone, et Borelli 2012) jouent un rôle déterminant sur le succès de réalisation des toitures vertes.

Sous l'influence d'un climat méditerranéen (Lionello et al. 2006), il est intéressant d'évaluer ce succès. Ce climat est caractérisé par deux périodes pluvieuses par an (automne (40%) et printemps (25%)) pour un cumul annuel de précipitations de 600 mm/an (période 1991-2020) et une période de sécheresse (Chenot 2018 ; infoclimat 2022). Au vu de ces conditions difficiles, la végétation choisie sur ces toitures vertes doit donc être capable de faire face à ces stress (manque en eau, chaleur, sécheresse prolongée) (Benvenuti et Bacci 2010), exacerbé dans le cas où la TV est extensive (c'est-à-dire ayant une profondeur de substrat faible, de 15 cm ou moins). Le nombre d'études réalisées sous ce climat reste encore relativement faible (Blank et al. 2013) mais utile afin de comprendre comment augmenter les performances de ces toitures, d'autant plus que les changements climatiques attendus dans certaines régions tempérées auront des conditions proches de celles rencontrées en méditerranée actuellement (Van Mechelen, Dutoit, et Hermy 2014). De récentes recherches ont prouvé que la théorie de l'habitat analogue (cf §1.2) pouvait être employée à bon escient pour optimiser les chances de survie de la végétation au niveau de ces nouveaux écosystèmes que constituent les toitures vertes (Lundholm, 2006; Van Mechelen, Dutoit, et Hermy 2014). Le choix de plantes adaptées (locales, régionales) à ce climat stressant pourrait s'avérer être la solution à ce problème (Oberndorfer et al. 2007).

L'objectif majeur de cette étude est de déterminer si une communauté végétale durable peut être créée et prospérer au cours du temps sur une toiture verte extensive en méditerranée. La durabilité de cette toiture verte doit ainsi être évaluée à travers ses deux composantes : la persistance et la résilience des communautés végétales. Cette étude comporte trois particularités : elle s'effectue à moyen terme, via une approche multi-compartmentale et écologique. En effet, il s'agit de faire le bilan de cette toiture 6 ans après sa mise en place, en étudiant indépendamment et de façon interconnectée : la végétation, sa banque de graines et les compositions chimiques du substrat de croissance, ce qui permet de caractériser la dynamique temporelle de la végétation sur la toiture (Figure 1). Enfin, une approche écologique a été choisie pour la mise en place et le maintien de cette toiture verte. Des déchets de carrières telles que des boues de lavage ont été employés afin de

constituer le substrat de croissance de cette toiture. La composition et le type de substrat influencent le succès des toitures vertes via leur capacité à retenir/drainer l'eau ainsi qu'à fournir les éléments chimiques nécessaires à la croissance de la végétation. La toiture verte n'est pas irriguée et aucune gestion ni intrants n'y ont été introduits depuis sa mise en place.

La toiture se veut autonome, "écosystémisée" au sein d'un climat méditerranéen. Sa banque de graines initiale a d'abord été constituée d'inoculum provenant d'une végétation d'intérêt conservatoire : les tonsures de la steppe de Crau. Cette banque de graines s'est ensuite potentiellement enrichie avec des apports de pluies de graines (Figure 1). En effet, le bâtiment sur lequel est situé la toiture est entouré d'espaces verts urbains (ou « pelouses urbaines ») desquelles pourraient provenir certaines des espèces retrouvées sur la toiture verte.

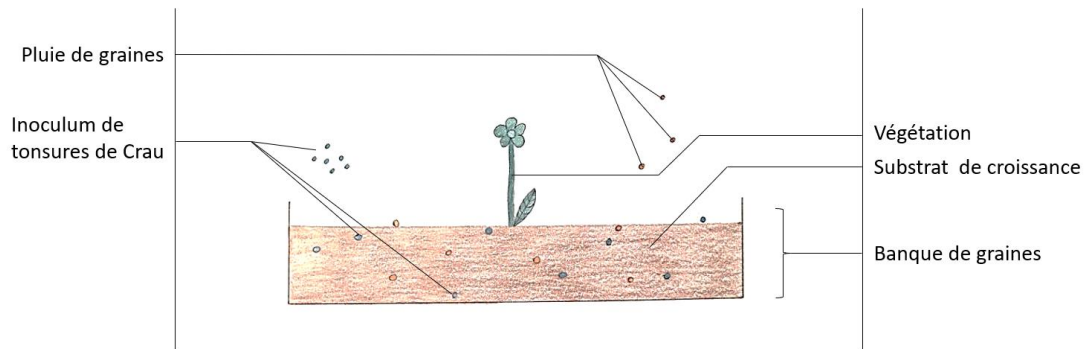


Figure 1: Schéma synthétique de la toiture verte étudiée avec ces 3 compartiments : végétation, banque de graines et substrat ; ainsi que ses inputs : inocula de Crau et pluie de graines.

## 1 .1. Les toitures vertes

### 1.1.1. Définitions

Le terme "toiture verte" (TV) fait référence à un toit plat à pentu, conçu pour supporter de la végétation et dont la profondeur de substrat est le critère principal de classification (Cavanaugh 2008; Dvorak et Volder 2010). Les toits verts extensifs (TVext) ont une profondeur de substrat de 15 cm ou moins tandis que les toits verts intensifs (TVint) dépassent ce seuil de profondeur (Li et Yeung 2014). Les premiers ont l'avantage d'être plus légers pour les bâtiments qui les supportent et requièrent une gestion moins intensive (pas ou peu d'arrosage, d'entretien) (Li et Yeung 2014; Magill et al. 2011). De ce fait, il s'agit du type de TV le plus répandu actuellement (Getter et Rowe 2006). Cependant, la végétation des TVext fait face à des contraintes plus fortes qu'en TVint au vu de la faible profondeur des premiers. Sur TVint, on peut aisément réaliser un potager, accueillir des plantes vivaces, des arbustes voire même des arbres tandis que sur TVext, les végétaux devront être résistants à la sécheresse et demander peu d'entretien, ces toitures auront des structures verticales moins variées par opposition aux TVint (ligneverte 2022).

Certains auteurs préfèrent définir les TV au-delà du critère de profondeur, en y incluant par exemple le rôle visé par ces structures (Bianchini et Hewage 2012), la dimension écologique des matériaux utilisés pour la construction des TV (Cavanaugh 2008) ou encore la considération de la "typologie écologique" qui serait selon Madre et al. (2014) plus adaptée à l'étude de la biodiversité.

### 1.1.2. Structure

Bien que la littérature différencie les toitures vertes extensives des intensives, la superposition classique des couches constituant ces toitures vertes leur est commune (Getter et Rowe 2006). Le système multicouche comporte (du bas vers le haut, Figure 2) : la toiture (élément porteur, pare-vapeur, isolant thermique, membrane d'étanchéité), une couche de barrière aux racines, une couche drainante, une troisième filtrante, le substrat de croissance et la végétation (Bianchini et Hewage 2012). La couche filtrante sert à retenir les particules du substrat (toiture-verte 2022) tandis que la couche drainante permet d'évacuer les excès d'eau. Des éléments structurants (sable, graviers) du sol forment des structures propices à l'accueil d'espèces végétales sur les toits qui possèdent ces matériaux via apports de semences de l'environnement extérieur (Chenot 2018; Jim 2017).

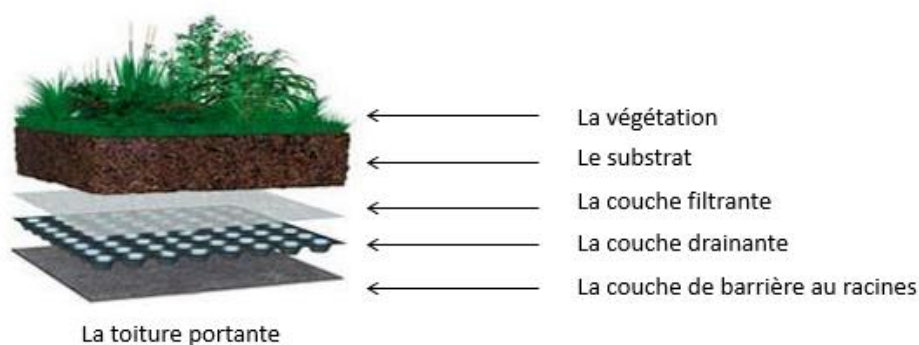


Figure 2: Organisation classique d'un toit vert (TV). Source : Toiture-verte 2022

### 1.1.3. Substrats et compositions physico-chimiques

En fonction du type de substrats utilisés : le poids à supporter pour le bâtiment, la capacité de rétention en eau (Poórová et Vranayová 2015) et l'impact écologique de la toiture verte seront plus ou moins importants. Les substrats des toitures vertes doivent permettre de retenir l'eau sans pour autant la laisser stagner, fournir les nutriments et donc une composition chimique particulière est nécessaire à la croissance des plantes (Perelli 2014). Le substrat doit également servir de support physique stable à la végétation tout en étant suffisamment léger que pour être pondéralement supportable pour la toiture portante. Des considérations plus écologiques, telles que les substances dont sont faites ces substrats sont également faites. L'usage de polyéthylène et/ou polypropylène pour les substrats ne sont pas respectueux de l'environnement bien qu'ils permettent de réduire le poids du substrat que le bâtiment doit supporter (Bianchini et Hewage 2012). Par opposition à ces substances polluantes, une étude a prouvé que l'utilisation de déchets verts compostés (à hauteur de 50% de la composition finale) pouvait assurer le rôle requis par le substrat de croissance des toitures vertes extensives avec autant, si pas plus qu'un substrat inerte, d'apports en nutriments nécessaires à la croissance des plantes. Avec cette proportion de compost, les ruissellements sont également limités (Fai Chow et Bin Ahmad Azlan 2020). Le cycle des nutriments sur les toitures vertes extensives est notamment régulé par : les communautés végétales, les caractéristiques du substrat ainsi que l'âge de la toiture selon Buffam et Mitchell (2015). De façon générale, les substrats des toitures vertes se composent d'un mix de minéraux naturels (sable, argile, graviers, pierre ponce, ..) et artificiel (schiste expansé, ardoise, vermiculite, laine de roche, ...), de matériaux recyclés ou de déchets (briques concassées, tuiles, béton cellulaire, sol, ...) et de matière organique (tourbe, compost, sciure, fibre de noix de coco, écorces, ...) (Ampim et al. 2010). L'utilisation de matériaux recyclés possède un double avantage : ils réduisent les transports de matériaux nécessaires et permettent de donner de la valeur à des déchets locaux n'ayant peu ou pas de débouchés (Ampim et al. 2010).

D'un point de vue physique, les matériaux tels que le sable et les galets forment des pores qui modulent la capacité de rétention en eau et la dissolution des nutriments du substrat (Jim 2017). La disponibilité en nutriments du sol peut également influencer le développement des plantes et la composition de leurs communautés (Vannucchi et al. 2022). L'étude de Vannucchi et al. (2022) sur TV a ainsi montré qu'une concentration en azote plus faible permet d'accroître la diversité fonctionnelle des plantes tandis que des substrats riches en azote sont envahis par les *Sedum*.

#### 1.1.4. *Choix de la végétation*

Le choix de la végétation en vue de réaliser une TV résiliente est d'autant plus cruciale dans le cas des TVext, soumises à des profondeurs de sol plus faibles et donc à des conditions environnementales plus stressantes (Ksiazek-Mikenas et al. 2018) que ce que ne le seraient les TV intensives. Van Mechelen et al. (2014) conseillent pour ce faire de sélectionner les plantes sur base de leurs traits fonctionnels, en favorisant les espèces ayant notamment des "adaptations à la sécheresse".

Dans le cadre de ce travail, il s'agira d'étudier une TV extensive non irriguée en climat méditerranéen. Les espèces végétales ont donc été choisies en tenant compte de ce triple stress (épaisseur faible de substrat, absence d'apport d'eau hors eaux de pluie, conditions de climat aride) et en considérant la théorie de l'habitat analogue afin de maximiser les chances de survie des plantes sur la TV.

## 1.2. L'habitat analogue

### 1.2.1. *Définition*

Selon Lundholm et Walker (2018) la théorie de l'habitat analogue permettrait de sélectionner les espèces végétales adaptées à un environnement artificiellement créé grâce à la recherche d'habitats naturels et locaux qui partagent des conditions environnementales proches de celles de l'habitat artificiel que l'on tente de créer. Pour des toitures vertes possédant une faible épaisseur de substrat (telles que les toitures vertes extensives), les habitats modèles qui partageraient des conditions environnementales proches seraient par exemple des zones exposées, locales, rocheuses ou encore infertiles (Lundholm et Walker 2018). Van Mechelen, Dutoit et Hermy (2014) soulignent également la ressemblance des conditions environnementales des TVext avec celles de certains biotopes méditerranéens d'un point de vue de la composition chimique des sols ("faibles en nutriments et calcicoles"), de la faible profondeur, des conditions climatiques rigoureuses (telles que les températures importantes et les faibles précipitations). La ressemblance de ces deux systèmes (TVext et biotopes méditerranéens) pourrait donc être utilisée afin de sélectionner des espèces adaptées aux conditions rudes rencontrées sur les toitures vertes extensives. C'est d'ailleurs ce que Catalano et al. (2016) recommandent en spécifiant que "les communautés de plantes régionales peuvent servir de modèle pour les phases de recrutement de graines et d'installation".

Au vu de ce constat, la TVext expérimentale de cette étude s'est donc inspirée d'une association d'espèces particulière au sein d'un écosystème méditerranéen fonctionnel, la plaine de La Crau. Dans cette hypothèse, la toiture verte fait office d'habitat analogue et les encroûtements biologiques de la plaine de La Crau constituent l'habitat modèle.

### 1.2.2. Les végétations de la plaine de La Crau : un modèle pour construire des TV analogues en climat méditerranéen ?

La plaine de la Crau, caractérisée par une végétation de steppe est localisée dans le sud-est de la France, au sein des Bouches-du-Rhône (Figures 3 et 4). L'écosystème de La Crau est l'un des milieux les plus extrêmes rencontrés au niveau méditerranéen en France et fonctionne sous l'influence du climat méditerranéen. Les espèces végétales que cette steppe contient ne sont pas endémiques mais ce milieu possède un intérêt en tant qu'habitat, en abritent des espèces faunistiques rares et endémiques (telles que : *Prionotropis hystrix rhodanica*, *Pterocles alchata*, *Tetrax tetrax*, *Falco naumanm*) (Buisson, Dutoit, et Wolff 2004). Au sein de la végétation steppique cette plaine, il est très fréquent d'observer des taches de compositions floristiques différentes de la végétation dominante et dont la taille est réduite à une surface de quelques mètres carrés. Molinier et Tallon ont nommé localement ces groupements de végétaux des "tonsure" (qui sont en fait des "encroûtements biologiques") (Rieux, Ritschel, et Roux 1977). Les caractéristiques physico-chimiques du sol y définissent les types de tonsures observables. Sur des sols argilo-calcaires de faible profondeur sans contact avec la nappe phréatique et uniquement irrigués par les eaux de pluie, les tonsures sont constituées d'une association, nommée "*Crassuletum tilliaeae*" (Rieux, Ritschel, et Roux 1977). Cette association est la plus résistante aux conditions xériques méditerranéenne pour un substrat de très faible profondeur et comprend des espèces typiques telles que : *Crassula tillaea* et de nombreuses espèces annuelles telles que *Filago pygmaea*, *Logfia gallica*, *Medicago minima*, etc. Ainsi que d'autres espèces : *Brachypodium distachyon*, *Bromus madritensis*, *Cerastium pumilum*, *Erophila verna*, *Helianthemum nummularium*, *Minuartia hybrida*, *Poa bulbosa*, *Saxifraga tridactylites*, *Vulpia ciliata* (Rieux, Ritschel, et Roux 1977). Le peuplement de ces tonsures est également caractérisé par une dominance d'espèces cryptogames (telles que les lichens et les mousses) (Rieux, Ritschel, et Roux 1977) (Figure 5). Henry (2009) souligne également l'intérêt de l'association du *Crassuletum tillaea* au vu de la richesse, la diversité végétale et la composition spécifique, qu'elle contient.

Les encroûtements biologiques (ou tonsures, Figure 5) de la plaine de la Crau ont été utilisés comme habitat analogue pour constituer la toiture verte étudiée dans ce travail. Les espèces typiques des tonsures ont été directement prélevées en Crau afin d'obtenir des espèces adaptées aux conditions climatiques méditerranéennes rigoureuses.



Figure 3: Limites approximatives de la plaine de La Crau. Source de la Figure : Eric Gaba, 2008.





Figure 4: Photo de la steppe de la Crau. © IP, 2022.



Figure 5: Photo d'une tonsure. © IP, 2022

### 1.2.3. Inoculation

Le terme “inocula” (“inoculum” au singulier) correspond ici à des échantillons de banques de graines (permanentes et transitoires) prélevés au niveau des tonsures de la steppe de Crau en juin 2015. Au mois de juin, la végétation a pu produire ses graines de l’année, constituant sa banque de graines transitoire avant leur germination automnale. Et, en récoltant ces graines à même le sol ainsi que sur 2 cm de profondeur, les échantillons contenaient donc aussi une partie de la banque de graines dite “permanente”, provenant des productions de graines d’années antérieures à 2015. Les échantillons de la banque de graines récoltées contenaient également une petite proportion de terre de laquelle ils n’ont pas été défaits lors de leur dépôt sur les substrats du TVext. Cela pourrait leur conférer une meilleure capacité à utiliser les ressources hydriques en cas de présence de mycorhizes (Allen et Allen 1986) que des semences qui auraient été semées simplement.

## 1.3. La banque de graines

### 1.3.1. Définition

La banque de graines du sol est : “un réservoir de graines viables ou de propagules végétatives présentes dans le sol et capables de recomposer une végétation naturelle” (Christoffoleti et Caetano 1998). Les banques de graines seraient une combinaison entre une part de la mémoire du passé et une part du potentiel du futur de la végétation. La mémoire du passé car les espèces ont pu exister et réaliser leur cycle complet et donc y avoir laissés leurs traces sous forme de graines (Hopfensperger 2007). Le potentiel du futur car les “réservoirs de biodiversité” qu’elles constituent peuvent, en cas de perturbation de la végétation en place ou de conditions extrêmes (sécheresse, gel), faire apparaître de nouvelles espèces qui auraient été cachées jusque-là (Hopfensperger 2007; Vanstockem, Vranken, et al. 2018).

### 1.3.2. Typologie

On distingue deux types majeurs de banques de graines. La banque de graines transitoires, incluant les graines de la couche supérieure du sol (Thompson, Bakker, et Bekker 1997). La banque de graines permanentes (ou persistantes), constituées de graines présentes uniquement au sein du sol à des profondeurs de 0 à 10 cm (Thompson, Bakker, et Bekker 1997) et âgées d’au moins un an (Christoffoleti et Caetano 1998; Walck et al. 2011). La longévité de ces banques de graines n’est pas la même. Alors que les graines des banques de graines transitoires ne subsistent qu’une saison à quelques années, celles des banques de graines permanentes peuvent persister sous forme de graines durant plusieurs années et donc être composées d’espèces de végétation qui ne serait plus en place au sein d’un milieu.

La bruyère commune (*Calluna vulgaris*) est un exemple notable de graines à longévité importante. Ses graines peuvent subsister jusqu'à un siècle au sein du sol et germer en cas de perturbation du milieu afin de reconstituer des communautés végétales (ex : mise en lumière par coupe de forêts plantées sur d'anciennes landes) (Willems 1988). Au niveau des TVext, Vanstockem, Ceusters, et al. (2018) disent d'ailleurs de la banque de graines qu'elle a un potentiel de restauration de la végétation dépendant des conditions (a)biotiques rencontrées et qu'elle constitue un réservoir de biodiversité qu'il ne faut pas ignorer. Comprendre la répartition en espèces de la végétation en place sur les toitures ainsi que celle présente dans le sol (la banque de graines) permettrait d'optimiser la gestion et la restauration de ces TVext (Vanstockem, Ceusters, et al. 2018).

Par ailleurs, certaines graines des banques de graines peuvent être "en dormance". Cette aptitude est propre à l'espèce et non à l'environnement (Thompson et al. 2003). La dormance permet aux graines de survivre en conditions non propices à leur germination (Bentsink et Koornneef 2008). Grâce à cette propriété, la germination des graines d'une banque de graines est optimisée et répartie aux moments adéquats tout au long de l'année (Sellier 2021; Bentsink et Koornneef 2008).

### 1.3.3. Etude de la banque de graines

Différentes méthodes existent pour étudier les banques de graines. On peut citer la séparation par flottaison, l'observation directe via un binoculaire après le tamisage, les analyses génétiques, ... Cependant, la méthode la plus répandue est la mise en germination d'échantillons de sols concentrés par tamisage. Heerdt et al. (1996) conseillent pour ce faire de tamiser et laver les échantillons de sol prélevés pour l'étude de la banque de graines et de les étaler ensuite sur une fine couche de terreau stérile. Cette méthode possède de nombreux avantages. Elle assurerait un nombre de germinations des graines de la BG plus élevée et plus rapide (95% de germination dans les six premières semaines) que dans le cas où les échantillons n'auraient pas été tamisés. Et, un troisième avantage de ce tamisage est que la concentration des graines augmente et diminue donc l'espace nécessaire en serre pour voir ces graines germer (Heerdt et al. 1996). Thompson, Bakker et Bekker (1997) conseillent d'utiliser un tamis de mailles de 0,2 mm afin de conserver les graines de plus petites tailles (0,212 mm selon Heerdt et al. (1996)). C'est également cette méthode qui sera utilisée dans le cadre de la présente étude.

## 1.4. La dynamique des communautés végétales

### 1.4.1. De la banque de graines à la communauté végétale

Dans les études de restauration de communautés végétales cibles, comprendre le rôle joué par la banque de graines en lien avec la végétation en place est un élément clé (Valkó et al. 2021). Très peu de recherches scientifiques ont par contre été réalisées à ce propos sur les toitures vertes, elles concernent plutôt les domaines de la restauration (Bossuyt et Honnay 2008; Willems et Bik 1998; Wang et al. 2020) et de la succession écologique (Bossuyt et Hermy 2004; Onésimo et al. 2021) ou encore des espèces envahissantes (Drake 1998; Orrock et Dutra 2012). Cependant, Vanstockem, Ceusters, et al. (2018) ont mené une étude de banque de graines sur TVext ayant permis d'affirmer le rôle dynamique qu'ont ces dernières pour la végétation apparente sur la TV. Bossuyt et Honnay (2008), dans une étude de restauration écologique, soutiennent qu'une restauration de communauté végétale par simple apport de graines n'est, dans la plupart des cas, pas suffisante car la banque de graines permettrait surtout de restaurer les premiers stades de successions écologiques. Cependant, il a plus récemment été montré que c'est un biais dans l'échantillonnage de la BG qui est responsable de la mauvaise prédictibilité de cette BG pour expliquer la végétation en place et non une raison biologique (Vandvik et al. 2016). Les banques de graines présentes au niveau des toitures extensives seraient comparables en termes d'abondance moyenne et de types d'espèces à celles des nouveaux écosystèmes (Vanstockem, Ceusters, et al. 2018). La richesse en espèces des banques de graines des TVext serait positivement influencée par la richesse spécifique retrouvée au niveau de la végétation

en place, l'âge de la toiture végétale et la période pendant laquelle les collectes de banque de graines ont été réalisées (Vanstockem, Ceusters, et al. 2018).

#### 1.4.2. La théorie des filtres et communautés végétales sur les TV

La théorie des filtres permet d'expliquer l'assemblage des espèces d'une communauté végétale selon 3 critères (ou "filtres") qui sélectionneraient les plantes adaptées à leur environnement (Booth et Swanton 2002). Le filtre de dispersion est le premier filtre à intervenir. La présence d'une espèce à un endroit donné dépend de sa capacité à pouvoir ou non atteindre ce lieu. Les filtres biotiques et abiotiques déterminent ensuite la capacité des espèces à survivre dans un environnement particulier, soumis aux conditions abiotiques de ce milieu (climat, profondeur et composition chimique du sol, ...) et aux interactions interspécifiques qui seront présentes (facilitation, compétition).

Les espèces non semées et donc dites "spontanées" peuvent avoir été disséminées par le vent, les insectes et/ou d'autres animaux (Jim 2017). On parle de "pluie de graines". Les sols nus sont soumis aux apports potentiels de ces pluies de graines régionales. Ces espèces spontanées n'étant pas forcément les espèces désirées sur les toitures vertes (TV), des espèces végétales visées peuvent être apportées au préalable (sous forme végétative et/ou semées) afin de limiter ces apports par pluies de graines. Certaines espèces spontanées sont rudérales. Le *Taraxacum officinale* a par exemple été identifié comme colonisateur spontané et rudéral couramment rencontré sur toitures vertes (Brown et Lundholm 2015). Brown et Lundholm (2015) ont également confirmé que les espèces rudérales des zones environnantes à la TV dominent les espèces semées sur cette dernière cinq ans après sa mise en place si la toiture n'est ni irriguée ni désherbée. Ces espèces sont capables de réaliser rapidement leur cycle de vie et ont des banques de graines importantes (Thuring et Dunnett 2019). Catalano et al. (2016) soulignent, dans une étude de toitures vertes intensives matures (30 ans après leur mise en place) et non gérées, l'importance d'accepter la présence des espèces spontanées (rudérales ou stress-tolérantes) étant donné qu'elles finissent par représenter une partie importante de la végétation apparente de ces TV.

Les filtres (ou conditions) (a)biotiques influencent eux aussi la présence (l'absence) de certaines espèces ainsi que leur dynamique au cours du temps.

En ce qui concerne les conditions abiotiques rencontrées sur les toitures vertes et qui influencent leur végétation, on peut citer : le climat (C. Thuring et Grant 2016) et ses événements particuliers (Brown et Lundholm 2015), l'ensoleillement, responsable de la création de microclimats expliquant des différences de diversités végétales sur une TV (Brown et Lundholm 2015; C. Thuring et Grant 2016), la profondeur du sol (Dunnett, Nagase, et Hallam 2008; Young 2014) permettant de retenir plus ou moins d'eau, l'irrigation (Chowdhury et Abaya 2018; Nagase et Dunnett 2010; Van Mechelen, Dutoit, et Hermy 2015) ou la fertilisation qui aident à favoriser la germination des graines (Vanstockem, Ceusters, et al. 2018), la composition chimique du substrat rendant disponible plus ou moins de nutriments nécessaires aux plantes (l'azote : Vannucchi et al. 2022 ; la matière organique : Bates et al. 2015).

Quant aux filtres biotiques, ils concernent les interactions inter- et intra- espèces. Ces interactions sont régies par des phénomènes de compétition ou de facilitation à l'installation ou la persistance d'une espèce parmi d'autres (Heim et Lundholm 2014).

## 1.5. Objectif et questions de recherches

L'objectif de cette étude est de déterminer la résilience d'une toiture verte extensive en climat méditerranéen ayant été mise en place par apport d'inoculum et soumises à des divers facteurs environnementaux (profondeur, inoculum, granulométrie). Pour tenter de répondre au mieux à cette objectif, les questions de recherches ont été séparées en 3 compartiments d'études qui sont analysés de façon interconnectées. Il s'agit d'étudier la dynamique temporelle de la végétation, sa banque de graines et les compositions chimiques des substrats sur la TVext ainsi que les liens qui les unissent, leur état initial (2016) et/ou final (2022).

### 1.5.1. La végétation

*Evolution de la végétation de la toiture verte :*

Question 1 : Comment évolue le couvert végétatif sur le toit au cours du temps et quel(s) facteur(s) (profondeur, inoculum, granulométrie) influence(nt) ce recouvrement ?

Question 2 : Comment évolue la richesse spécifique sur le toit au cours du temps ?

Question 3 : Comment évolue la composition taxonomique (espèces et leur recouvrement) sur le toit au cours du temps et quel(s) facteur(s) (année, profondeur, inoculum, granulométrie) influence(nt) les assemblages des communautés observées ?

Question 4 : Quelle est la composition taxonomique finale (2022) observée sur le toit et par quel(s) facteur(s) (profondeur, inoculum, granulométrie) est-elle le plus influencée ?

*Similarités de la végétation de la toiture verte avec les végétations des pelouses environnantes et des tonsures de Crau :*

Question 5 : A quel point les communautés végétales des tonsures de Crau (2016), de la toiture (2016, 2018, 2022) et des pelouses environnantes (2022) sont-elles similaires entre-elles d'un point de vue des espèces présentes ?

### 1.5.2. La banque de graines

Question : Quelles espèces sont présentes dans la banque de graines, en quelle abondance et quel est leur ratio vis-à-vis de la végétation en place sur le toit ? Ces espèces sont-elles plutôt spécifiques des pelouses environnantes de la toiture verte (spontanées) ou bien typiques des tonsures de Crau (via inoculum) ?

### 1.5.3. Le substrat

Question : Vers quelle composition chimique évoluent les substrats au cours du temps ?

## 2 - MATERIELS ET METHODES

### 2.1. Lieu d'étude

L'expérimentation de toit vert extensif se situe sur le toit de l'Institut Universitaire Technologique (IUT) d'Avignon (43°54'37''N 4°53'19''E) (France) et a été mise en place en avril 2016. Le climat est de type méditerranéen, caractérisé à Avignon par une température moyenne annuelle de 15,1°C (période 1991-2020) avec un minimum moyen atteint en janvier (1,8°C) et un maximum moyen atteint en juillet (32,2°C) (infoclimat 2022). Le cumul moyen des précipitations se situe aux alentours de 600 mm/an (période 1991-2020) (infoclimat 2022). Les événements pluvieux sont principalement répartis en automne (40%) et au printemps (25%) (Chenot 2018). Enfin, un vent notable dénommé le Mistral contribue à accentuer la sécheresse de cette région avec des rafales pouvant atteindre jusqu'à 140 km/h pour les mois de janvier à mars. Il est garant d'un nombre d'heures d'ensoleillement non négligeable pour la région d'une moyenne de 2660 H/an (climatetvoyage 2022). Il s'agit du type de climat "Csa" selon la classification de Köppen (Chen et Chen 2013).

### 2.2. Design de l'expérimentation

L'expérimentation est composée de 96 unités expérimentales (ou « quadrats ») d'1m<sup>2</sup> (1mx1m). Chaque unité expérimentale a été construite comme l'indique le schéma ci-dessous avec, du haut vers le bas : une couche de substrat de croissance pour la végétation (de profondeur et granulométrie variable), une couche de géotextile (pour ses propriétés anti-racinaires), une couche drainante faite de galets (sur une épaisseur de 2cm), une membrane d'étanchéité, un isolant thermique ainsi qu'un pare-vapeur ont également été apposés sur la structure portante (Figure 6). La couche de substrat est ici composée d'éléments fins et grossiers en quantités variées afin de constituer 3 types de substrats différents et de créer un facteur de « granulométrie » (ou « type de substrats »). Ce facteur a été créé dans l'hypothèse où ces différents mélanges granulométriques créeraient des conditions de drainage différenciées pour les substrats. Les éléments fins proviennent de boues de lavage des matériaux en carrière composés exclusivement d'argiles et de limons (de 0 à 50 µm). Tandis que les éléments grossiers sont des cailloutis du durancien (de 0 à 30 mm) qui ont été criblés (triés). Tous deux sont issus de la carrière de La Ménudelle, localisée dans la steppe de la Crau. Ces matériaux sont des "déchets de carrières" et ont donc été recyclés dans le cadre de cette expérimentation afin de servir de substrat, support à la végétation. Dans le substrat de cette étude, on retrouve également 3% de compost. Ces éléments ont tous été mélangés à sec, afin d'optimiser leur homogénéisation (Chenot 2018).

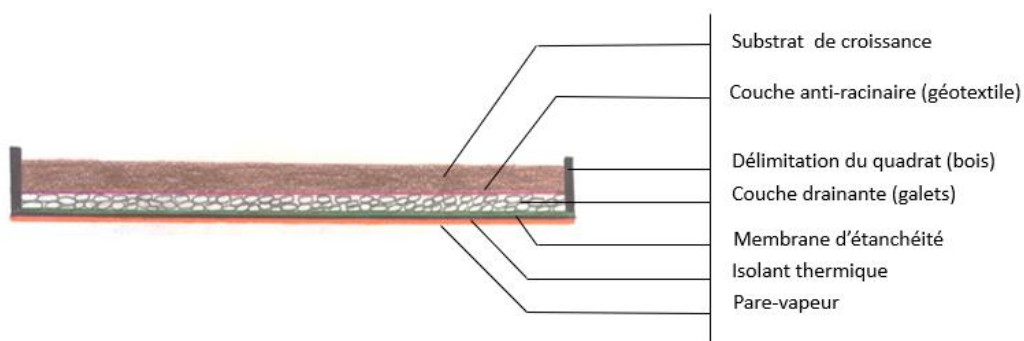


Figure 6: Schéma de l'unité expérimentale générale sur le toit de l'IUT d'Avignon.

Pour cette expérimentation, trois facteurs environnementaux (Figure 7) sont testés et la répartition spatiale de leurs modalités au sein des quadrats y est aléatoire (Figures 8 à 10). Les facteurs testés et leurs modalités sont (Figure 7) :

- La profondeur du substrat : 15 cm - 5 cm ;
- La granulométrie du substrat : peu drainant - moyennement drainant - très drainant. Avec des proportions respectives de matériaux grossiers et fins de : 25%-75%, 50%-50%, 75%-25%.

Les différentes granulométries établies pourraient avoir des conséquences sur la capacité de drainage de ces trois types de substrats. Il s'agit de la raison pour laquelle ce facteur a été testé.

- L'inoculum : inoculé ou non.

L'inoculum consiste en une banque de graines (transitoire et permanente) récoltée au niveau de la couche superficielle du sol (les deux premiers centimètres) de tondues de la steppe de Crau. Ces inocula ont été récoltés en juin 2015 via 110 prélèvements de 30x30cm de surface (Chenot 2018). Les échantillons récoltés ont tous été rassemblés entre-eux (volume total de 1.800 cm<sup>3</sup>) pour ensuite être répartis équitablement au sein de 48 quadrats de la TVext (soit 37,5 cm<sup>3</sup>/quadrat) (Figures 7 à 10).

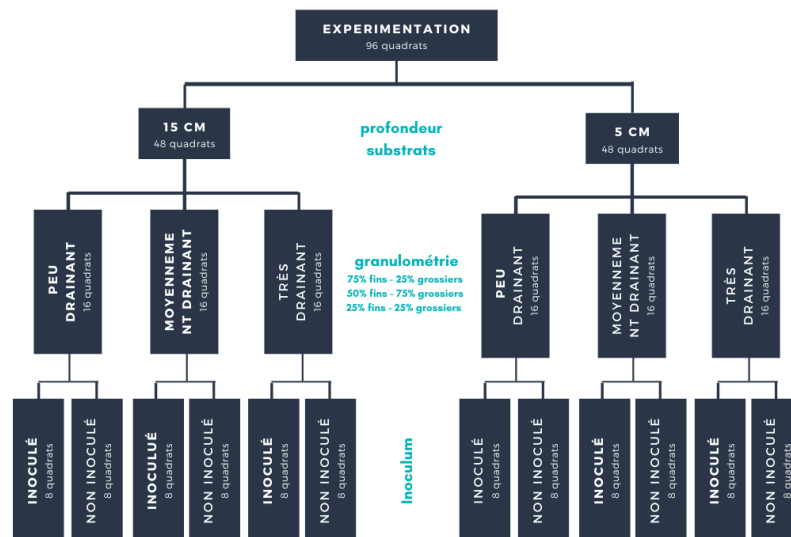


Figure 7: Diagramme expérimental du toit vert



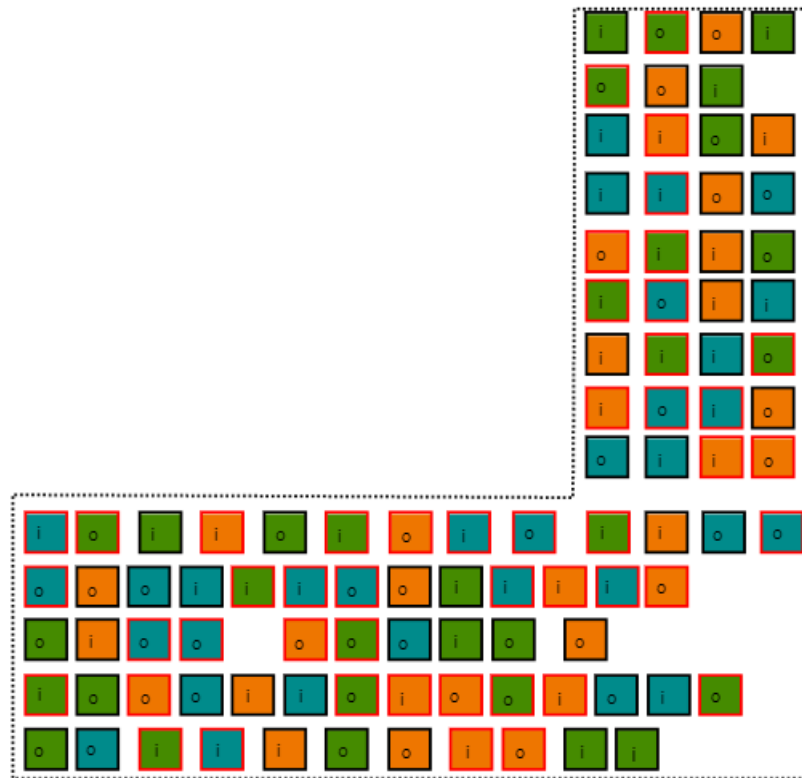


Figure 8 : Schéma du design expérimental du toit vert. Légende : les lettres *i* et *o* désignent respectivement le fait que ces quadrats soient ou non inoculés. Les couleurs de remplissage des quadrats indiquent la modalité de granulométrie qui leur est attribuée (% matériel grossier - % matériel fin) : vert (très drainant : 75%-25%), orange (moyennement drainant : 50% - 50%), bleu (peu drainant : 25%-75%). Les couleurs des rebords représentent les profondeurs de substrats associées : rouge (5cm) et noir (15cm).



Figure 9 : Photos du design expérimental du toit vert. La photo correspond à la partie inférieure de la Figure 2.



Figure 10 : Photos du design expérimental du toit vert. La photo correspond à la partie supérieure de la Figure 2.

Il existe 8 répliques de chacune des combinaisons des 3 facteurs (Profondeur, Granulométrie, Inoculum) représentant 12 combinaisons.

En 2022, les 96 quadrats ont été répartis en 48 quadrats pour les mesures non destructives (végétation et prélèvement de substrat pour l'étude de la banque de graines) (Tableau 1). La végétation a été relevées sur les 48 quadrats non perturbés reprenant toutes modalités confondues : les 2 profondeurs de sol, les 3 types de granulométrie et les 2 modalités d'inoculum (4 répétitions par combinaison).

Pour éviter de détruire les substrats et les communautés végétales des quadrats avec une profondeur de 5 cm seulement, les substrats et la banque de graines ont été étudiés uniquement sur les substrats de 15 cm de profondeur. Les substrats ont été prélevés sur les 24 quadrats non perturbés de 15 cm de profondeur correspondant aux quadrats de relevés de végétation représentant les modalités d'inoculum et de granulométrie. Les substrats ont été prélevés pour l'étude de la banque de graines sur les 24 quadrats de 15 cm de profondeur réservés pour les mesures destructives représentant les modalités d'inoculum et de granulométrie.

Les analyses de végétation et de substrats ont été également réalisées en 2016 et 2018 par Chenot (2018) selon les mêmes protocoles que ceux que nous avons réalisés en 2022.

Tableau 1 : Les quadrats concernés par les analyses faites sur la végétation, le substrat et la banque de graines.

	5 cm non destructif	15 cm non destructif	15 cm destructif
Végétation	24 quadrats	24 quadrats	-
Banque de graines	-	-	24 quadrats
Substrat	-	24 quadrats	-

## 2.3. Collecte des données

### 2.3.1. Végétation

#### a) La végétation de la toiture verte (TV)

Le pourcentage de recouvrement par espèce a été estimé visuellement dans les 48 quadrats non destructifs (Tableau 1). Le recouvrement a été également estimé pour : la strate muscinale, les lichens, le sol nu, les galets et la végétation globale. Ces données ont été récoltées fin mars 2022. Les mêmes types de relevés avaient été réalisés fin juin 2016 et fin mars 2018 (Chenot, 2018) et seront utilisés pour les analyses d'évolution de la végétation.

#### b) La végétation des pelouses environnantes au toit vert

La toiture verte de l'étude est située au sein d'un zoning péri-urbain contenant également de nombreux espaces verts (friches, pelouses urbaines issues de semis, ..). Des relevés au sein des communautés végétales de ces pelouses urbaines environnantes à la TV ont donc été réalisés en mai 2022. Quatre types de pelouses ont été sélectionnées pour ces relevés selon leur degré de tonte : très souvent tondues (plus de 2 fois par mois), souvent tondues (une fois par mois), occasionnellement tondues (de 3 à 5 fois par an) et rarement tondues (non tondues ou seulement 1 fois l'an). Pour chacune de ces types de pelouses, 3 lieux ont été choisis. Il y a donc eu 3 répétitions (lieux) de 4 quadrats (d'1mx1m) par pelouses (4 types) et donc 48 quadrats relevés pour les pelouses autour du toit vert de l'IUT. Les relevés ont été réalisés avec la même méthodologie que pour les quadrats de la toiture : recouvrement par espèces ainsi que pour la strate muscinale, les lichens, le sol nu, les galets et la végétation globale.

#### c) La végétation des encroûtements biologiques de la Crau

Pour caractériser la végétation des pelouses des tonsures dont sont issus les inocula ayant servi aux ensemencements d'une partie des quadrats, nous avons utilisés plusieurs sources de données (Chenot 2018; Rieux, Ritschel, et Roux 1977 ; Martin 2018, données non publiées) ainsi qu'une validation par un expert de cet environnement (Thierry Dutoit).



En avril 2016, la végétation dans 42 quadrats de 20x20cm a été relevée selon les 5 mêmes classes (%mousses, %lichens, %sol nu, % galets et %végétation globale et par espèce) au niveau de zones non perturbées par les prélèvements des inocula de l'année précédente de ces encroûtements biologiques de Crau (Chenot 2018). Ces données seront uniquement utilisées à titre qualitatif afin d'identifier les espèces indicatrices de ces milieux dont les inocula du toit sont issus. Une autre source d'information pour ce caractère indicateur ou non des espèces végétales provient de listes écologiques et phytosociologiques du *Crassuletum tilliaee* de Molinier et Tallon 1949-1977 (Rieux, Ritschel, et Roux 1977). Encore, une liste de relevés de végétation de Gabrielle Martin (Martin 2018, données non publiées) aura permis de compléter cette liste.

### 2.3.2. Banque de graines de la TV

Sur les 24 quadrats concernés par l'analyse (Tableau 1), 1L de sol a été échantillonné par quadrat. L'échantillon a été récolté à l'aide d'une pelle dans les quatre coins des quadrats dans une profondeur de 5cm (Figure 11). Les graviers et la végétation ne contribuant pas à la détermination des futures germinations étaient systématiquement retirés de l'échantillon et donc non comptabilisés dans ces litres de sol. Étant donné la présence de galets plus ou moins gros (0 à 30 mm), un carottage de sol n'aurait pas été possible.

Les échantillons ont ensuite été placés au frigo pendant 5 jours afin d'éviter les germinations avant la mise en culture. Ces échantillons de sol ont ensuite été placés un à un dans des seaux d'eau et mélangés à la pelle afin de placer les graines en suspension. Les mélanges ont ensuite été entièrement tamisés à l'aide de 2 tamis placés l'un au-dessus de l'autre (Figure 11). Le premier tamis était de mailles de 2mm et le second, sous-jacent au premier possédait des mailles de 200µm. Une fois le contenu tamisé et la boue écoulée (à l'aide d'eau claire du robinet), le contenu de chacun des tamis de 200µm a été étalé sur des terrines composées de substrat ( $\frac{2}{3}$  de terreau et  $\frac{1}{3}$  de vermiculite) surplombées d'une gaze stérile (Figure 11) le tout préalablement humidifié. Ces 24 terrines ont alors été placées en conditions stables et contrôlées d'une serre (22°C et 53% HR) (Figure 11). Elles ont été arrosées tous les deux à trois jours et identifiées régulièrement sur une période de 5 mois. Les identifications ont été réalisées grâce aux livres de références suivants : "Mauvaises herbes des cultures" 1997 et 2002 et "Seedlings of the North-western European lowland" of Dr F. M. Muller. Une fois identifiées, les plantules étaient retirées des terrines. Pour celles dont l'identification au stade jeune plantules n'a pas pu être faite, leur mise en culture a été nécessaire.



a) Visualisation des 4 endroits de prélèvement de la banque de graines sur un quadrat.

b) Tamis superposés.

c) Préparation de terrines utilisées pour la mise en germination.

d) Germination de la banque de graines au niveau d'un des terrines.

Figure 11: Illustrations de la récolte à l'identification des espèces de la banque de graines.

### 2.3.3. Substrats

En avril 2016 et 2018 (Chenot 2018) ainsi qu'en février 2022, 24 échantillons de sol ont été récoltés pour être analysés. Ils provenaient des quadrats de 15 cm de profondeur non destructifs (Tableau 1). Environ 50 gr de substrat des 5 premiers cm de chacun de ces quadrats était collecté au niveau de 3 zones choisies aléatoirement au sein de ces carrés d'1m x 1m (N= 3 granulométries × 2 inoculum × 4 répliques). Les galets et la végétation la plus grossière étaient retirés manuellement de ces échantillons et les trous superficiels créés par ces prélèvements ont été minimisés par le recouvrement de ces tris manuels. Les quadrats de 5 cm de profondeur n'ont pas été échantillonnés en raison de l'impact important de ce prélèvement sur de si faibles profondeurs. Les 24 échantillons ont ensuite été placés sous étuve pendant une semaine à 50°C (pour séchage) avant d'être tamisé (tamis de maille de 2 mm) puis envoyés au laboratoire d'analyse des sols de l'INRA (*Institut National de Recherche Agronomique*) d'Arras afin que ce dernier réalise les analyses physico-chimiques nécessaires.

Les paramètres chimiques et analysés et les méthodes employées sont (Chenot 2018) :

- L'azote total (N), calculé par combustion à sec (Bremner, 1996) ;
- Le carbone organique (C) (Allison 1965);
- Le rapport carbone/azote (C/N) ;
- Le pH de l'eau, ratio 1:5(Thomas 1996) ;
- Le carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>), calculé à l'aide d'un calcimètre de Bernard (Sparks 1996) ;
- Le phosphore (P) (Olsen 1954) ;
- La capacité d'échange cationique (CEC) ;
- Le potassium (K), calculé par la méthode de Metson (Metson 1956).

## 2.4. Analyses des données

L'ensemble des analyses ont été effectuée avec les logiciels R 4.0.2 (*R Core Team, 2022*) et Microsoft Excel 2016 (*Microsoft Corporation, 2016*).

En vis-à-vis des questions de recherches posées au niveau de l'introduction (cf §1.5), les méthodes d'analyses de chacune d'entre-elles pour les 3 compartiments étudiés (végétation, banque de graines, substrat) sont détaillée ci-après.

### 2.4.1. Végétation

#### a) L'évolution de la végétation de la toiture verte au cours du temps

L'évolution des recouvrements moyens de la végétation par quadrat a été analysée via deux ANOVA à 3 facteurs croisés ("aov", package stats) pour les années 2016 et 2022. Cela afin de déterminer les influences significatives de ces facteurs environnementaux (profondeur, inoculum, granulométrie) sur le recouvrement végétatif moyen par quadrat. En cas de significativité des facteurs, des tests ont ensuite été utilisés afin d'identifier si les moyennes des modalités des facteurs étaient ou non significativement différentes les unes des autres. Lorsque le nombre de moyennes à comparer était supérieur à 2 et les conditions paramétriques rencontrées, le test post-hoc de Tuckey a été utilisé. Lorsque le nombre de moyennes à comparer était supérieur à 2 et les conditions paramétriques non rencontrées, le test de Kruskal-Wallis a été employé.

L'évolution de composition végétale sur le toit au cours du temps a été analysée via l'indice de similarité Jaccard. Cet indice permet de comparer la ressemblance en termes de présence (absence) de deux « systèmes ». Par « systèmes », il faut ici comprendre « environnements d'études », « groupes d'espèces » à comparer. L'indice se base sur la présence (absence) des espèces entre les deux systèmes visés (Equation 1). Au plus l'indice est proche de 1, au plus les systèmes sont proches d'un point de vue similarité entre espèces. Au plus l'indice est proche de zéro, au plus les systèmes étudiés sont dissimilaires, au moins ils ont d'espèces communes.

*Equation 1 : Indice de similarité de Jaccard. Annotations :  $N_c$  = nombre d'espèces communes aux 2 systèmes étudiés ;  $N_1, N_2$  = nombre d'espèces présentes respectivement : dans le système 1, dans le système 2.*

$$I_J = \frac{N_c}{(N_1 + N_2 - N_c)}$$

Afin de caractériser l'évolution de la composition taxonomique sur la toiture verte (types d'espèces et recouvrement) au cours du temps et en fonction des facteurs étudiés (profondeur, inoculum, granulométrie), deux Analyses en Coordonnées Principales (PCoA) ont été réalisées sur des matrices de dissimilarités de Bray-Curtis avec les relevés de végétation des communautés végétales sur le toit.

La première PCoA inclut les relevés d'abondance par espèces des 3 années de relevés (2016, 2018, 2022). Des ordispiders (« ordispider », package vegan) ont été ajoutées afin d'identifier les centroïdes des 3 années étudiées (2016, 2018, 2022). Ces centroïdes indiquent les variabilités de composition taxonomique retrouvées au sein de la toiture. Des analyses PERMANOVA (« adonis2 », package vegan) ont permis de déterminer les facteurs significatifs qui expliquent les différenciations entre les communautés végétales parmi les années, les profondeurs, les quadrats inoculés ou non et les différentes modalités de granulométrie testées. Une corrélation de Pearson (« cor », package stats) a été représentée afin de déterminer les espèces les plus corrélées aux axes de la PCoA.

La seconde PCoA a uniquement été réalisée sur base des relevés de végétation de 2022. La même méthodologie a été employée que pour la première PCoA si ce n'est que le facteur année n'a pas été étudié. Les ordispiders ont ici été réalisées à l'aide des modalités des 3 facteurs environnementaux afin de visualiser les facteurs environnementaux influençant le plus la répartition de ces espèces, de faire le lien avec la présence (absence) et/ou l'abondance des espèces végétales située dans le même espace d'ordination que les centroïdes des modalités des facteurs étudiés (profondeur (15 cm, 5 cm), inoculum (inoculé, non inoculé), granulométrie (peu drainant, moyennement drainant, très drainant)).

#### *b) La végétation de la toiture verte, des pelouses environnantes et des tonsures de Crau*

Afin de connaître la proximité taxonomique existant entre les communautés végétales des tonsures de Crau (2016), de la toiture verte (2016, 2018, 2022) et des pelouses environnantes à cette toiture (2022), des indices de Jaccard (Equation 1) ont été calculés entre :

- La végétation des tonsures de Crau (2016) avec celle des toitures vertes (TV) pour 2016, 2018 et 2022 (individuellement) ;
- La végétation des pelouses environnantes (2022) avec celle des TV pour les années 2016, 2018 et 2022 (individuellement).

#### *2.4.2. Banque de graines*

L'indice de similarité de Jaccard a été employé pour comparer la ressemblance, en termes d'espèces, de la banque de graines permanente de 2022 avec la végétation apparente de 2022 (Equation 1).

### 2.4.3. Substrats

Pour visualiser l'évolution temporelle des compositions chimiques des substrats, une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été réalisée sur les valeurs des paramètres chimiques évalués (cf § 2.3.3) des 3 années de suivis (2016, 2018 et 2022). Des ellipses avec 95% d'intervalle de confiance ont été ajoutées afin de représenter les 3 années de suivis et visualiser l'évolution globale des compositions chimiques des substrats au cours du temps. Les vecteurs des paramètres chimiques du sol sont également représentés afin d'indiquer les paramètres qui « tirent » les axes.

Les valeurs de ces paramètres chimiques pour 2016 et 2022 ont également été comparées via des tests t appariés (lorsque les conditions paramétriques ont été rencontrées) ou via des tests de Wilcoxon (lorsque les conditions paramétriques n'ont pas été rencontrées).

## 3 - RESULTATS

### 3.1. Végétation

#### 3.1.1. L'évolution du couvert végétal du TVext

Le pourcentage de recouvrement végétatif moyen par quadrat sur le toit a évolué au cours du temps. Depuis la mise en place du TVext en 2016 jusqu'en 2022, le pourcentage de recouvrement végétatif moyen annuel est passé de 4% à presque 30% et le pourcentage de quadrats non pourvus de végétation a diminué de 46 à 8% entre 2016 et 2018 (soit de 22 à 4 quadrats sur les 48 étudiés) (Tableaux 1 et 2). En 2022 par contre, tous les quadrats étudiés possédaient un recouvrement végétatif moyen au moins supérieur ou égal à 1%.

Tableau 2: Pourcentage de recouvrement végétatif moyen et pourcentage de quadrats sans recouvrement végétatif en 2016, 2018 et 2022 sur le TVext (Toit Vert extensif).

Années	Recouvrement végétatif moyen (%)	Quadrats ayant 0% de recouvrement végétatif (%)
2016	4,0 ± 7,5	46,0
2018	18,8 ± 23,8	8,0
2022	29,7 ± 28,7	0

En 2016, l'interaction des facteurs profondeur et inoculum influençaient significativement les pourcentages de recouvrement végétatif de la toiture verte (p-valeur de 0,0374) (Tableau 3a). Les recouvrements moyens des quadrats inoculés et profonds (I\_15) sont significativement plus élevés que les profonds non inoculés (15\_O), suivis de ceux de plus faibles profondeurs, inoculés ou non (I\_5, O\_5) (Tableau 4). La même constatation est faite pour les recouvrements moyens des quadrats profonds (15 cm) vis-à-vis des peu profonds (5 cm) (Tableau 4). Enfin, malgré une différence significative moins marquée (p-valeur = 0,0952), les quadrats inoculés (I) en 2016 avaient des recouvrements végétatif moyens plus élevés que ceux non inoculés (O) (Tableaux 3a et 4). Par contre, les différentes modalités de granulométrie ne permettaient pas d'obtenir des abondances de couvert végétatif significativement différentes (Tableau 3a).

Tableau 3a : Résultats de l'analyse de variance à 3 facteurs (profondeur, inoculum, granulométrie) vis-à-vis du pourcentage moyen de couvert végétal par quadrat en 2016. Légende des annotations : NS = Non Significatif ; . = Significatif pour un  $\alpha = 1\%$  ; \* = Significatif pour un  $\alpha = 5\%$  ; \*\*\* = Très Hautement Significatif.

2016			
Facteurs testés	Df	F	P-valeur
profondeur- inoculum- granulométrie	2	0,207	0,814 (NS)
profondeur - inoculum	1	4,607	0,0374 (*)
profondeur- granulométrie	2	0,623	0,541 (NS)
inoculum- granulométrie	2	0,677	0,513 (NS)
profondeur	1	13,83	0,000543 (***)
inoculum	1	2,902	0,0952 (.)
granulométrie	2	0,599	0,554 (NS)

En 2022, les mêmes facteurs et interaction entre facteurs sont significatives (Tableau 3b). Cependant, le facteur inoculum est cette fois significatif avec un seuil de 5% ( $\alpha = 5\%$ ) (Tableau 3b).

Aucune différence significative n'a été identifiée entre les moyennes des recouvrements végétatifs des quadrats de 5 cm de profondeur ( $p$ -valeur=0,6694). Qu'ils aient (I\_5) ou non (O\_5) été inoculés, ces quadrats de 5 cm de profondeur n'ont donc pas de pourcentage de recouvrement moyen significativement différents (Figure 12). Pour les quadrats de 15 cm inoculés (I\_15) ou non (O\_15), les moyennes sont par contre significativement différentes ( $p$ -valeur = 0,00035) et valent respectivement  $65,7\% \pm 21,91\%$  et  $36,3\% \pm 6,6\%$  (Tableau 4). L'inoculation a donc un effet sur le recouvrement végétatif moyen observé mais cet effet n'est pas le même selon la profondeur du substrat. Au plus le substrat de croissance de la végétation est profond, au plus le recouvrement végétatif sera important.

Tableau 3b : Résultats de l'analyse de variance à 3 facteurs (profondeur, inoculum, granulométrie) vis-à-vis du pourcentage moyen de couvert végétal par quadrat en 2022. Légende des annotations : NS = Non Significatif ; . = Significatif pour un  $\alpha = 1\%$  ; \* = Significatif pour un  $\alpha = 5\%$  ; \*\*\* = Très Hautement Significatif.

2022			
Facteurs testés	Df	F	P-valeur
profondeur- inoculum- granulométrie	2	0,04	0,961 (NS)
profondeur - inoculum	1	5,431	0,0244 (*)
profondeur- granulométrie	2	2,302	0,113 (NS)
inoculum- granulométrie	2	0,316	0,731 (NS)
profondeur	1	58,03	<0,0001 (***)
inoculum	1	5,429	0,0242(*)
granulométrie	2	1,382	0,262 (NS)

Tableau 4 : Moyennes et écart-types des pourcentages de recouvrement végétatif moyen des modalités des facteurs qui étaient significatifs pour 2016 et 2022.

Modalités	2016	2022
Inoculé 15 cm	11,4 $\pm$ 8,2	65,7 $\pm$ 21,9
Inoculé 5 cm	0,4 $\pm$ 1,4	12,3 $\pm$ 18,8
Non inoculé 15 cm	3,7 $\pm$ 9,0	36,3 $\pm$ 13,5
Non inoculé 5 cm	0,4 $\pm$ 1,2	4,7 $\pm$ 6,6

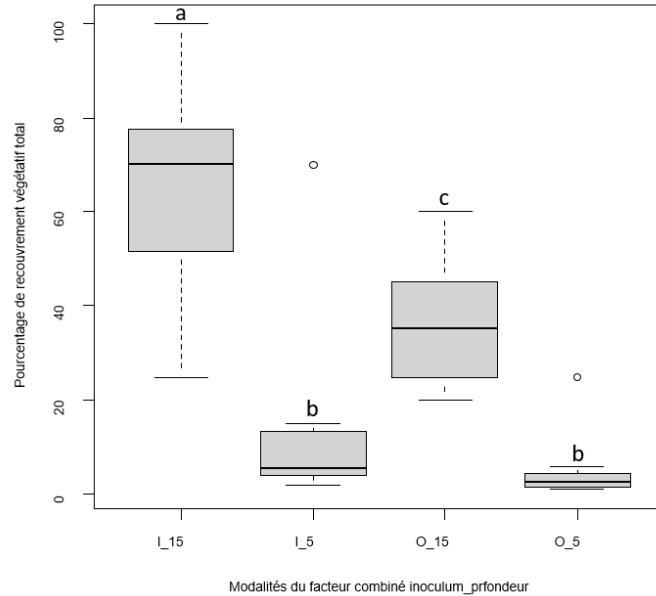


Figure 12 : Box plot des pourcentages de recouvrement de la végétation en fonction des différentes modalités de l'interaction des facteurs "inoculum" et "profondeur" en 2022. Légende de l'axe x : I = inoculé ; O = non inoculé ; 15 = 15 cm et 5 = 5 cm.

### 3.1.2. L'évolution de la richesse spécifique du TVext

Le nombre d'espèces végétales sur la toiture verte a évolué au cours du temps, passant de 25 espèces au départ (2016) à 76 espèces en 2018 et 46 espèces en 2022.

Les facteurs testés (profondeur, inoculum, granulométrie) ont aussi un impact sur la richesse spécifique à l'échelle des unités expérimentales. Que ce soit pour 2016 ou 2022, les quadrats les plus profonds ainsi que ceux qui ont été inoculés possèdent un nombre d'espèces par m<sup>2</sup> plus important (Tableau 5).

Tableau 5 : Moyennes et écart-types du nombre d'espèces moyen par quadrat en 2016 et 2022 en fonction des modalités des facteurs étudiés (profondeur, inoculum, granulométrie).

Modalités des facteurs étudiés	2016	2022
Moyenne (nombre/m <sup>2</sup> )	2,7 ± 3,7	8,2 ± 4,7
15 cm	4,2 ± 4,4	9 ± 5,0
5 cm	1 ± 1,7	7,5 ± 4,3
Inoculé	4,8 ± 4,2	12,1 ± 2,8
Non inoculé	0,6 ± 1,3	4,3 ± 2,3
Très drainant	2,6 ± 3,8	8,5 ± 4,5
Moyennement drainant	2,4 ± 4,2	7,3 ± 4,4
Peu drainant	3 ± 3,4	8,9 ± 5,2

### 3.1.3. Evolution temporelle de la composition floristique globale du TVext

Entre les années 2018 et 2022 au niveau de la toiture végétale, 38 espèces sont communes. L'indice de similarité de Jaccard entre ces deux années d'étude est le plus élevé et vaut 0,45 (Figure 13). Cela signifie que le nombre d'espèces communes aux 2 années est quasiment égal au nombre d'espèces dissimilaires inventoriées pour ces deux années d'étude. Entre les années 2016 et 2018, cet indice possède une valeur inférieure (0,19) (Figure 13). Il y a donc eu un changement du pool d'espèces plus important entre ces deux années (2016-2018) que vis-à-vis des années 2018-2022. On peut donc dire qu'une forme de stabilité en termes d'espèces présentes s'est installée au cours du temps sur la toiture verte.

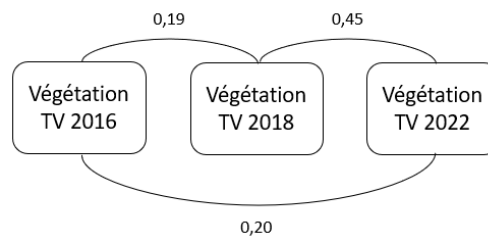


Figure 13: Schéma des indices de similarités de Jaccard entre les 3 années d'études de la végétation sur la TV.

Les espèces dominantes en 2016 ne sont pas les mêmes que celles qui dominent en 2018 ou 2022 hormis *Poa bulbosa*. Seuls 16 espèces sont communes aux années 2016-2018 contre 38 entre les années 2018-2022 sur la toiture verte (TV). Depuis 2016, 16 des 25 espèces initialement présentes sont encore observées en 2022.

En 2016, on retrouve par ordre décroissant d'abondance : *Lobularia maritima*, *Poa bulbosa*, *Soda kali*, *Diplotaxis tenuifolia*, *Atriplex prostata* et *Medicago truncatula* (Figures 14). Le pourcentage de recouvrement moyen de la végétation en 2016 est d'environ 4% (Tableau 1) dont 2,7% sont des espèces typiques des tonsures de Crau (Figure 14b) et 1,3% sont des espèces spontanées (Figure 14a).

En 2018, de nombreuses espèces qui étaient absentes en 2016 sont apparues (Figures 14). On retrouve *Crepis sancta et bursifolia*, *Catapodium rigidum*, *Rostraria cristata*, *Anisantha madritensis*, *Crassula tillaea*, *Cardamina hirsuta*, *Senecio vulgaris*, *Poa annua*, des luzernes (*Medicago* : *monspeliaca*, *rigidula*, *minima*), des trèfles (*Trifolium* : *campestre*, *cheleri*, *glomeratum*, *stellatum*, *suffocatum*, *tomentosum*), etc (Figures 14). L'année 2018 est l'année la plus riche en espèces (76) pour la TV. Quant au recouvrement moyen de la végétation en 2018, il était d'environ 19% (Tableau 2 ; Figures 14 a et b).

En 2022, le pourcentage de recouvrement végétatif moyen atteint presque 30% (Tableau 2) malgré que le nombre d'espèces inventoriées à cette année ai diminué (46 espèces en 2022 contre 76 en 2018). De ces 46 espèces en 2022, 38 sont communes à 2018. Les 8 espèces apparues en 2022 sont donc : *Botriochloa sp.* et *Conyza sp.* qui sont des espèces spontanées ainsi que les espèces typiques des tonsures de Crau suivantes : *Crepis vesicaria*, *Euphorbia helioscopia*, *Filago gallica*, *Lolium rigidum*, *Sedum sediforme* et *Taraxacum campylodes* (Figures 14). Les recouvrements végétatifs sont composés à 83,9% d'espèces de Crau, 16% d'espèces spontanées et 0,1% d'espèces d'arbre (*Sophora sp.*). Comme pour 2018, c'est *P. annua* et *C. sancta* qui dominent ces couverts végétatifs (Figures 14).



Remarque : la seule espèce de types « arbre », à l'état de plantule observée en 2018 et 2022 est *Sophora sp.* Elle n'a jamais dépassé un couvert moyen de végétation supérieur à 0,1% pour ces deux années de relevés. L'espèce était absente en 2016.

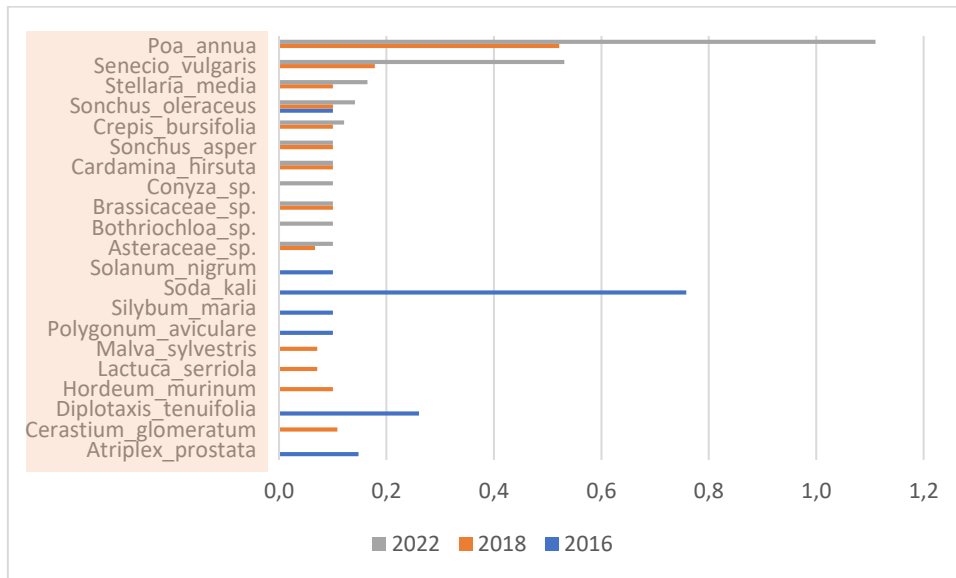


Figure 14 a : Histogramme du pourcentage de recouvrement moyen par espèces sur le TVext en 2016, 2018 et 2022. Espèces spontanées.

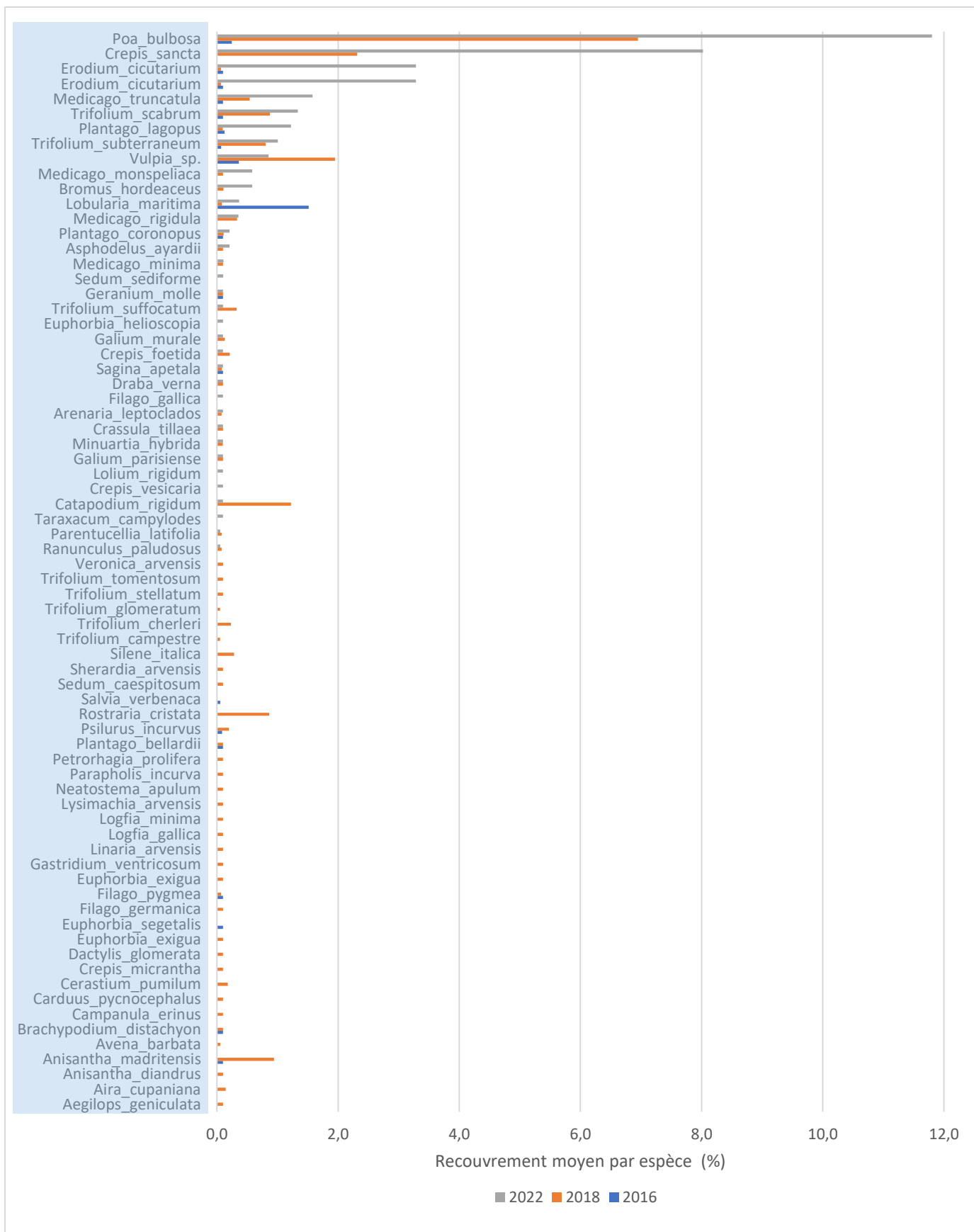


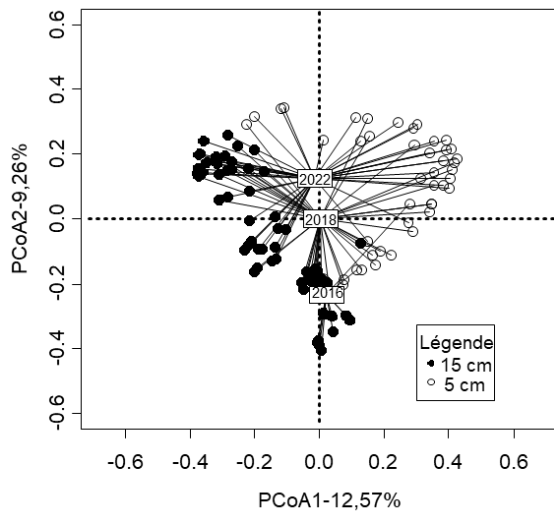
Figure 14b : Histogramme du pourcentage de recouvrement moyen par espèces sur le Ttext en 2016, 2018 et 2022. Espèces de tonsures de Crau.

### 3.1.4. Evolution temporelle de la composition floristique globale en fonction des facteurs étudiés

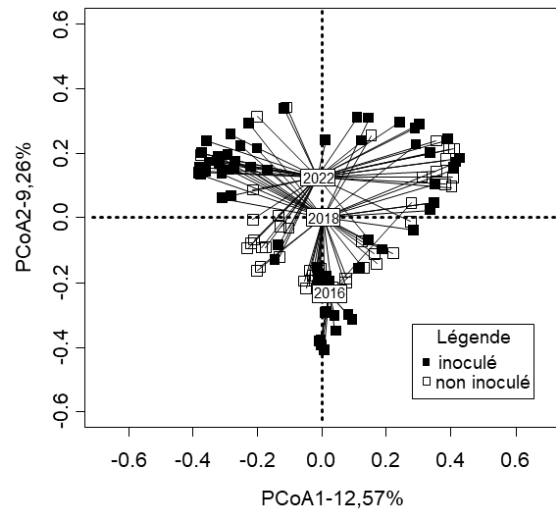
Pour les trois années de relevés (2016, 2018 et 2022), la PcoA explique 21,83% de la variabilité des compositions floristiques des quadrats (PcoA1 = 12,57% ; PcoA2 = 9,26%) (Figures 15). La composition des communautés végétales évolue significativement au cours du temps (Permanova du facteur année : p-valeur = 0,001 ;  $R^2 = 0,091$ ) et est principalement expliquée selon l'axe 2 de la PcoA (« PcoA2 ») (Figures 15). On observe également qu'une diversification de ces communautés s'est opérée pour les années 2018 et 2022 (nuage de points plus dispersé). En 2016, année de la mise en place de l'expérimentation, de nombreux quadrats (46%, Tableau 2) avaient un recouvrement végétatif nul et un pool de 25 espèces différentes. Ce constat pourrait expliquer la plus faible diversification des communautés végétales en 2016 (Figures 15).

La profondeur est le facteur le plus discriminant (Permanova : p-valeur = 0,001 ;  $R^2 = 0,083$ ) qui puisse expliquer les différences en termes des communautés végétales observées et est principalement expliquée par l'axe 1 de la PcoA, c'est-à-dire par l'axe expliquant le plus de variabilité de celle observée au sein des communautés végétales de la TV (Figure 15a). Le facteur inoculum est également significatif (Permanova : p-valeur = 0,001 ;  $R^2 = 0,031$ ) (Figure 15b). Une distinction de ces communautés se fait également selon les types de granulométrie testées au cours du temps (Permanova : p-valeur = 0,025 ;  $R^2 = 0,024$ ) (Figure 15c).

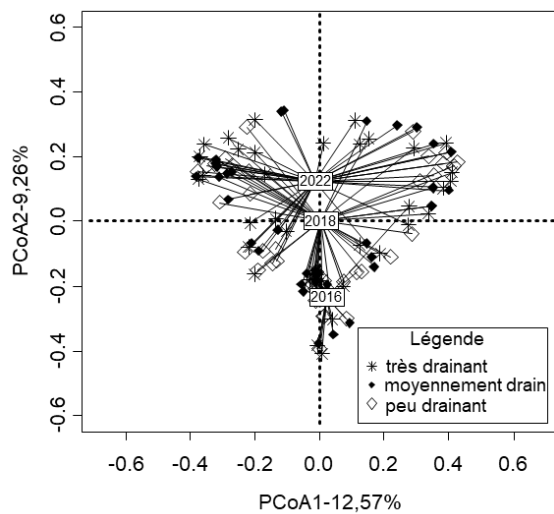
La projection des espèces relevées sur la Ttext au cours des 3 années de suivis est dense (Figure 15d). On remarque une abondance d'espèces au niveau de la partie négative de l'axe 1 de la PcoA, cohérente avec les conclusions faites précédemment pour 2022 quant au pourcentage de recouvrement végétatif total qui est plus abondant dans les quadrats inoculés de plus grande profondeur (Tableau 4). Alors que des espèces plus rares, telles que *Solanum nigrum*, *Sedum caespitosum* et *Diplotaxis tenuifolia* sont présentes aux extrémités du patch condensé des espèces de cette PcoA (Figure 15d), traduisant une abondance et/ou présence plus faible, plus rare. En se concentrant sur les espèces les plus corrélées aux axes de la PcoA, on constate que les espèces sont principalement liées au premier axe (PcoA1) et se placent sur la partie négative de la PcoA (Figure 15e). Cette partie négative correspond donc aux communautés végétales observées dans les quadrats de 15 cm (par opposition à ceux de 5 cm qui se situent sur la partie positive de l'axe 1) (Figures 15 a et e). Tandis que *Lobularia maritima* est plutôt corrélée à l'axe 2 de la PcoA et donc plutôt à la distribution des communautés végétales selon les années (Figures 15). *Poa bulbosa*, *Trifolium scabrum* et *Lobularia maritima* et *Crepis sancta* sont des espèces typiques des tonsures de Crau.



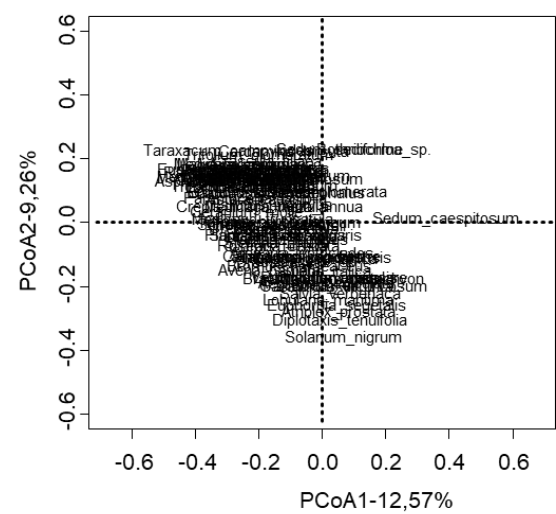
a) les profondeurs des substrats (15 et 5 cm)



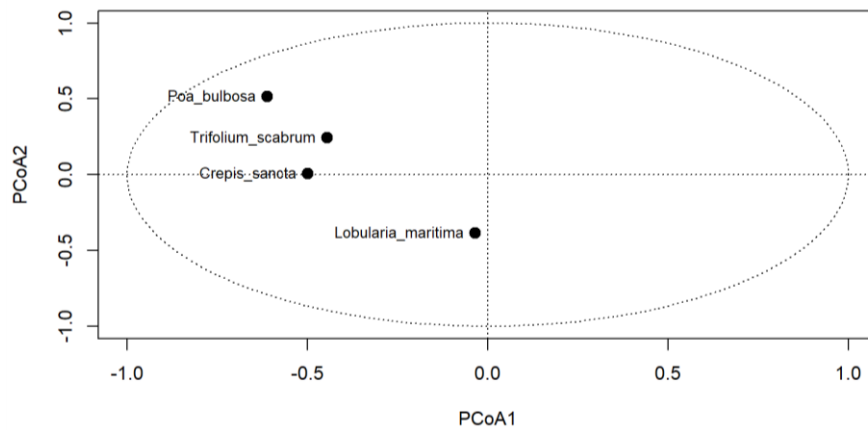
b) le facteur inoculum (inoculé ou non inoculé)



c) les granulométries des substrats (peu drainant, moyennement drainant, très drainant)



d) les espèces du couvert végétal inventoriées



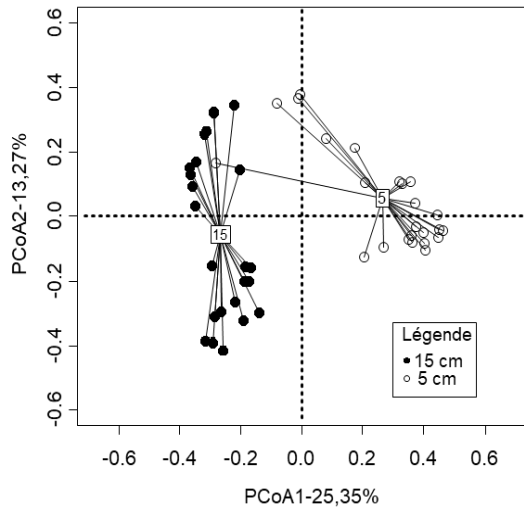
e) les espèces du couvert végétal ayant une corrélation  $\geq 0,32$

Figure 15 : PcoA des relevés de végétation du Ttext de 2016, 2018 et 2022.

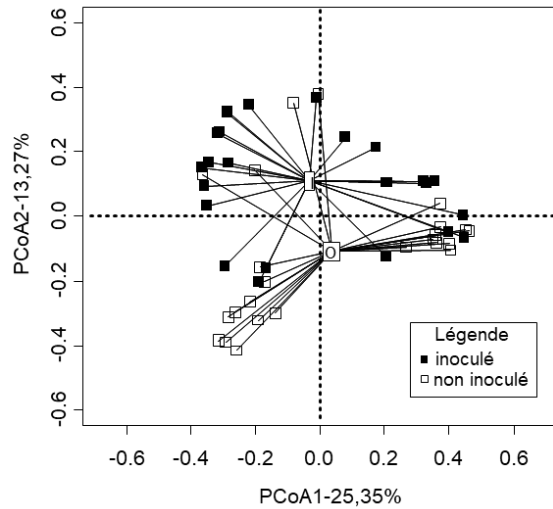
### 3.1.5. Structuration de la composition floristique en fonction des facteurs étudiés en 2022

Pour étudier la structuration finale des compositions floristiques, une PcoA a été représentée pour l'année 2022 (Figures 16). Les deux premiers axes expliquent respectivement 25,35% et 13,27% de la variabilité de ces communautés végétales (soit 38,62% au total). Le long du premier axe, on observe une discrimination claire des communautés présentes sur les quadrats de 5 cm de profondeurs (coordonnées positives) vis-à-vis de celles sur ceux de 15 cm (coordonnées négatives) (Figure 16a) soutenue par une p-valeur significative de Permanova de 0,01 ( $R^2 = 0,209$ ). L'inoculation des quadrats est également responsable d'une différenciation en termes d'assemblage végétal qui se traduit le long du second axe de la PcoA (Permanova : p-valeur = 0,04 ;  $R^2 = 0,048$ ) (Figure 16b). Cependant, aucune distinction ne peut se voir selon les modalités de granulométrie pour l'année 2022 (Permanova : p-valeur = 0,35 ;  $R^2 = 0,033$ ) (Figure 16c).

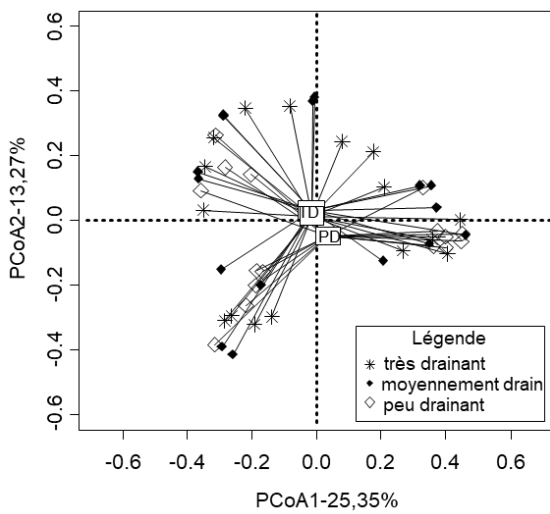
En 2022, les espèces sont majoritairement réparties sur les coordonnées négatives de l'axe 1 de la PcoA, c'est-à-dire du même côté que les quadrats de 15 cm de profondeur (Figures 16a et 16d). En se concentrant sur les espèces les plus corrélées aux axes de la PcoA, on constate qu'elles se placent également sur la partie de négative de la PcoA. (Figure 16e). Les quadrats de 15 cm de profondeur inoculés sont donc caractérisés par un ensemble d'espèces dont : *Poa bulbosa*, *Erodium cicutarium*, *Trifolium scabrum*, *Medicago monspeliaca*, *Ranunculus paludosus*, *Crepis sancta*, *Lobularia maritima* et *Crassula tilaea* sont des espèces typiques des tonsures de Crau tandis que *Crepis bursifolia*, n'en fait pas partie. Leur présence et/ou abondance pour ces quadrats plus profonds et inoculés vis-à-vis de ceux de 5 cm est donc avérée. Les quadrats inoculés, rassemblés majoritairement à la partie négative du graphique de la PcoA (Figure 16b) possèdent donc en abondance et/ou en présence les espèces suivantes : *P. bulbosa*, *T. scabrum*, *R. paludosus*, *E. cicutarium* (Figure 16e). Tandis que les quadrats de 15 cm non inoculés sont principalement composés de *Poa annua* (S, espèces non typiques des tonsures de Crau) et d'espèces typiques des tonsures de Crau telles que : *Diplotaxis tenuifolia*, *Crepis vesicaria*, *Plantago coronopus*, *Lobularia maritima* et *Sagina apetala*.



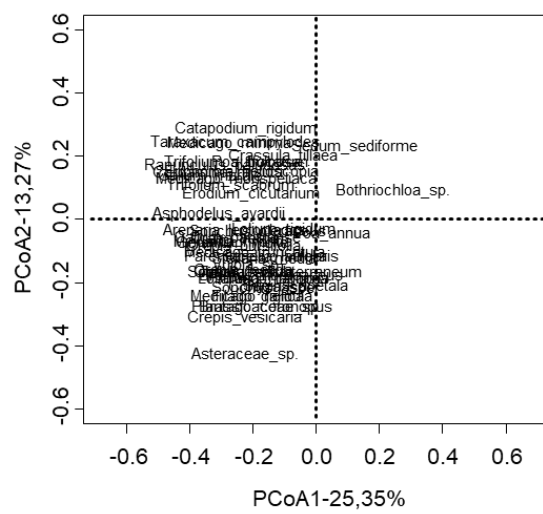
a) les profondeurs des substrats (15 et 5 cm)



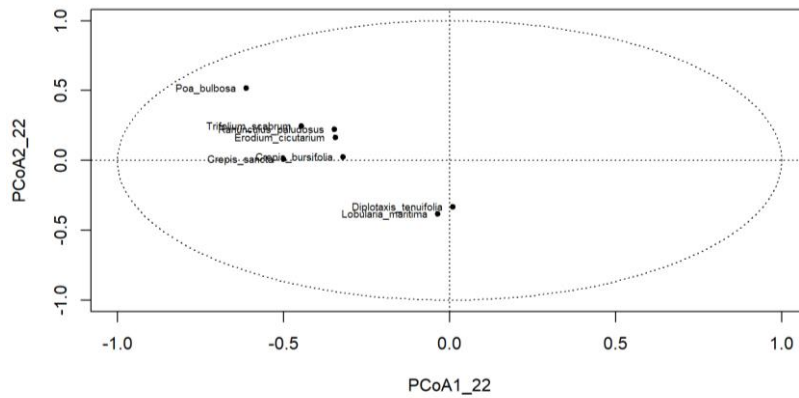
b) le facteur inoculum (inoculé ou non inoculé)



c) les granulométries des substrats (peu drainant (PD), moyennement drainant (MD), très drainant (TD))



d) les espèces du couvert végétales inventoriées



e) les espèces du couvert végétal ayant une corrélation  $\geq 0,32$ .

Figure 16 : PCoA des relevés de végétation du TVext de 2022.

### 3.1.6. Ressemblances des communautés végétales de la TVext, des pelouses environnantes et des tonsures de Crau

L'indice de similarité de Jaccard ( $I_j$ ) permet d'obtenir une idée de la ressemblance entre deux systèmes d'étude (Equation 1). Au plus ces systèmes se ressemblent, au plus l'indice est proche de 1. A contrario, au plus ils sont dissimilaires, au plus l'indice liant ces deux systèmes est proche de zéro. Les calculs de similarité se sont ici basés sur le nombre d'espèces (communes et individuelles aux systèmes étudiés deux à deux) (Figure 17). Il semblerait qu'en 2018, la toiture verte (TV) était plus similaire en termes d'espèces au milieu source (inoculum des tonsures de Crau : C16,  $I_j$  de 0,29) et au milieu duquel elle est entourée (pelouses environnantes : P22,  $I_j$  de 0,30) qu'en 2016 et 2022. Sur la TV en 2016, on constate que la végétation est légèrement plus similaire à celle des tonsures de Crau (0,11) qu'à celle des pelouses environnantes au TV (0,08). Or, en 2022, la part d'espèces communes à la TV et aux pelouses environnantes (P) diminue (0,15) au profit d'une augmentation de la part des espèces typiques des tonsures de Crau (0,22). Globalement, on observe donc que la part d'espèces typiques des tonsures de Crau sur la TV augmente au cours du temps malgré un léger déclin de richesse spécifique entre 2018 et 2022.

Le nombre d'espèces en commun le plus important (63) est observé entre la végétation des toitures vertes en 2018 et celle des pelouses environnantes. Malgré que les valeurs des indices de Jaccard soient proches entre la végétation des tonsures de Crau (C16) et la toiture verte en 2018 (TV18) ( $I_j$  de 0,29) et entre les pelouses (P22) et la toiture verte en 2018 (TV18) ( $I_j$  de 0,30), le nombre d'espèces en commun des deux systèmes comparés passe respectivement du simple (28 espèces) au double (63 espèces).

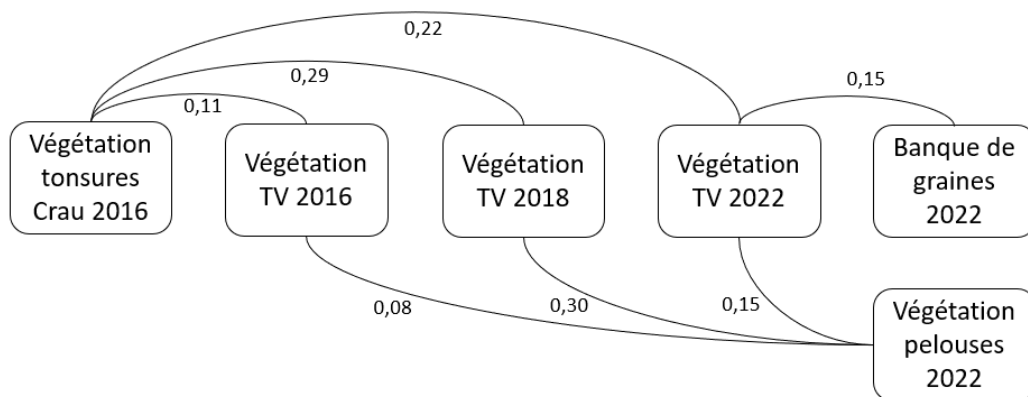


Figure 17 : Schéma des systèmes étudiés et de leurs ressemblances calculées via l'indice de similarité de Jaccard.

### 3.2. Banque de graines

La banque de graines de la TVext récoltée et mise en condition de germination en février 2022 contenait 23 espèces différentes. En plaçant les densités de graines de la BG ayant germées avec les pourcentages de recouvrement moyen par espèces sur le TVext en 2022, on remarque que les espèces abondantes dans un système ne sont pas les mêmes que celles abondantes dans l'autre (Figure 18). Les espèces de la banque de graines sont principalement de type spontanées (77,19 %, en orange sur la Figure 18). Les autres sont typiques des tonsures de Crau (8,00%, en bleu sur la Figure 18) ou sont des arbres (14,81%, en vert sur la Figure 18) dont *Populus alba*. Pour la végétation, la tendance n'est pas la même, la part d'espèces typiques des tonsures de Crau est majoritaire (90,69%) contre seulement 9,03% d'espèces spontanées et 0,28% d'arbre (*Sophora sp.*). La banque de graines en place sur la TVext n'est donc pas un bon indicateur de la végétation aérienne en place pour la même année d'étude. Cela est également soutenu par la faible valeur de l'indice de Jaccard (0,15) liant la végétation apparente sur la TVext en 2022 et la banque de graines de 2022 (Figure 17).

Remarque : les plantules de *Portulaca oleracea* était présentes dans un seul bac à germination, à raison de 589 individus. Il s'agit de l'échantillon de la banque de graines d'un quadrat de 15 cm de profondeur, non inoculé et moyennement drainant.



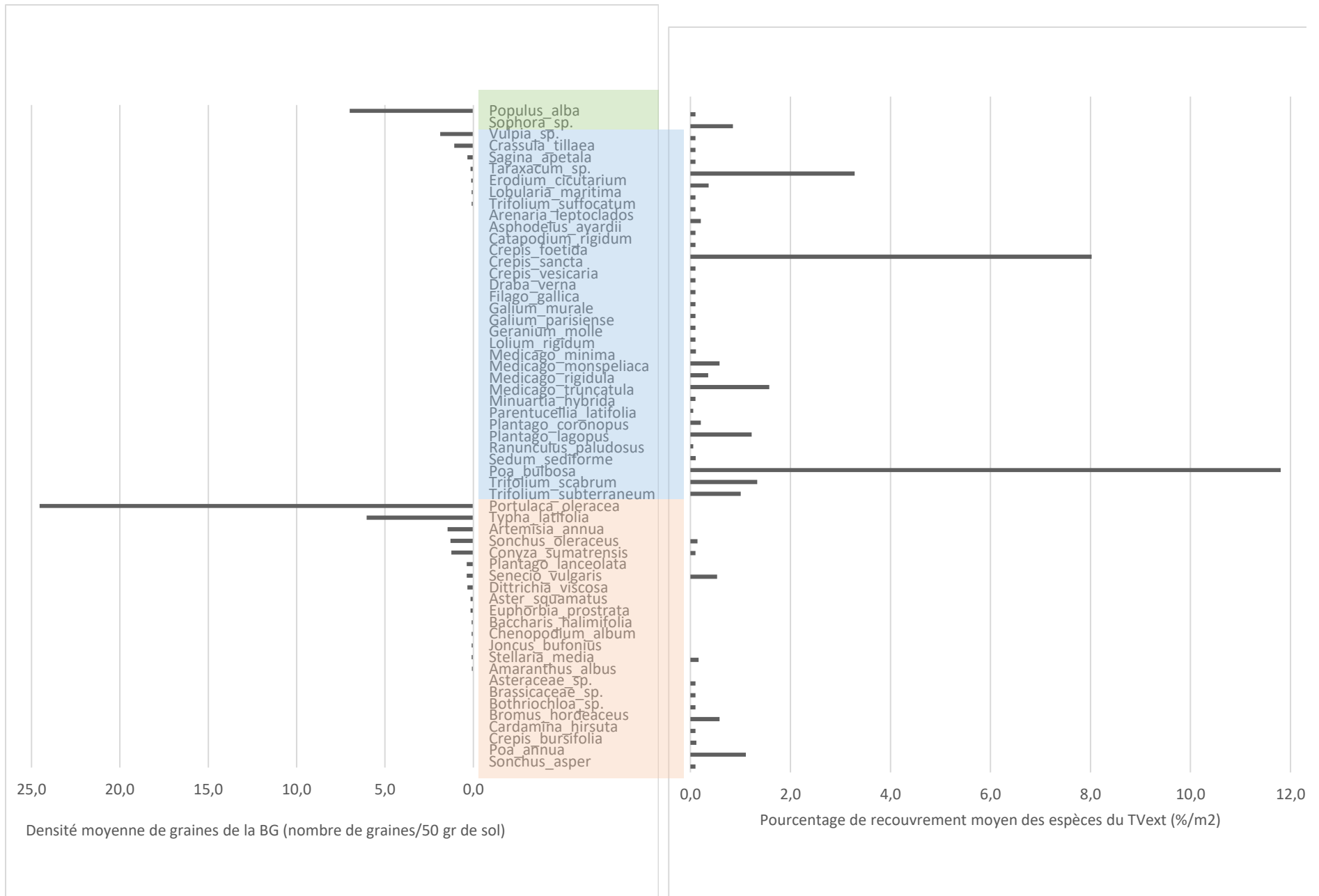


Figure 18 : Histogramme de la densité de graines de la BG permanente du TVext en 2022 (partie de gauche) et du pourcentage de recouvrement moyen par espèces sur le TVext en 2022 (partie de droite). Légende des couleurs des espèces : arbres (vert), tonsures de Crau (bleu), spontanées (orange).

### 3.3. Substrat

Pour étudier l'évolution temporelle de la composition chimique des substrats, une ACP ainsi que des analyses univariées ont été réalisées. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) des paramètres chimiques des substrats pour les trois années permet d'expliquer 66,9% de la variabilité observée sur les deux premiers axes (ACP1 = 43,3% ; ACP2 = 23,6%) (Figure 19). Les ellipses, tracées à 95% d'intervalle de confiance, montrent que les années 2016 et 2018 sont plus proches entre elles en termes de composition chimique et se distinguent des mesures en 2022 sur l'axe 1. Cette différenciation est corrélée à une augmentation du contenu en carbone (C), azote (N) et potassium (K), une augmentation de la capacité d'échange cationique (CEC) et du rapport C/N ainsi qu'à une diminution du pH (Figure 19 et Tableau 6).

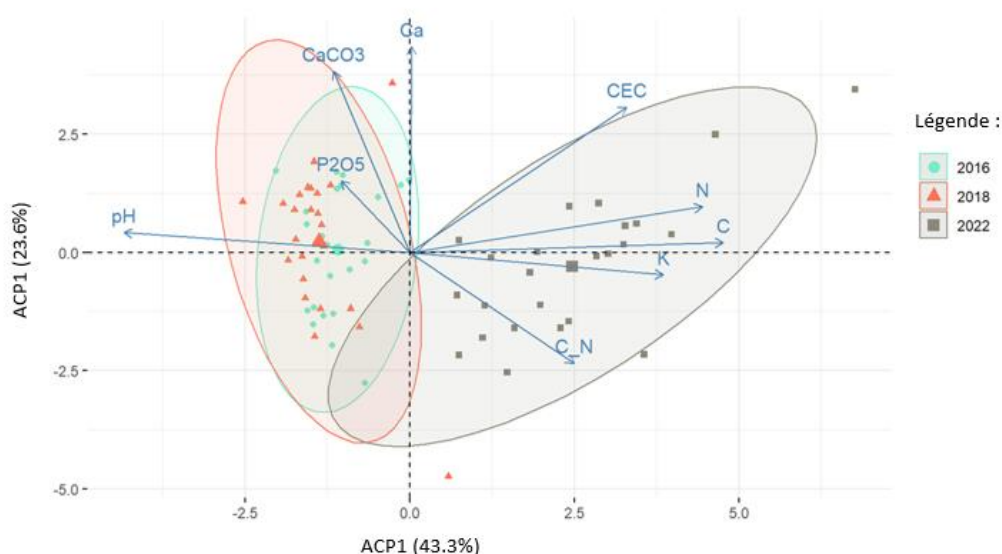


Figure 19 : ACP des paramètres chimiques des substrats pour les années 2016, 2018 et 2022 et les ellipses correspondantes aux années étudiées (IC de 95%).

Les conditions d'applications ont toutes été respectées pour Ca et CaCO<sub>3</sub>. Cependant, les p-valeurs de leurs tests t appariés sont non significatifs (respectivement 0,398 et 0,246) (Tableau 6). Leurs moyennes n'étaient pas significativement différentes pour les années 2016 et 2022. Pour tous les autres paramètres chimiques étudiés, la condition de normalité n'a pas été respectée et leurs p-valeurs ont donc été obtenues via des tests de Wilcoxon (Tableau 6). Seuls le pH et le phosphore ont faiblement diminué (de façon très hautement significative toutefois), tous les autres paramètres chimiques ont significativement augmenté entre 2016 et 2018 (p-valeur < 0,0001). Les augmentations écologiques de concentration des paramètres chimiques les plus notables sont celles du carbone (C, 70,4%), de la matière organique (MO, 70,5%) et de l'azote (N, 66,1%) (Tableau 6).

Tableau 6 : Évolution des concentrations des paramètres chimiques des substrats entre 2016 et 2022.

Paramètres chimiques	2016	2022	Tendance de l'évolution	p-valeur
C (g/kg)	4,73 ± 0,965	16,0 ± 6,52	↗ 70,4%	< 0,0001 (***)
N (g/kg)	0,362 ± 0,049	1,07 ± 0,5	↗ 66,1%	< 0,0001 (***)
C/N	13,1 ± 2,17	15,3 ± 3,54	↗ 14,3%	< 0,0001 (***)
MO	8,18 ± 1,67	27,8 ± 11,3	↗ 70,5%	< 0,0001 (***)
pH eau	8,76 ± 0,096	8,51 ± 0,101	↘ 2,9%	< 0,0001 (***)
P (g/kg)	0,018 ± 0,005	0,008 ± 0,006	↘ 55,6%	< 0,0001 (***)
CEC (cmol+/kg)	3,49 ± 0,404	4,27 ± 0,883	↗ 18,3%	< 0,0001 (***)
K (g/kg)	0,032 ± 0,004	0,085 ± 0,029	↗ 62,4%	< 0,0001 (***)
Ca (g/kg)	7,06 ± 0,18	7,01 ± 0,209	-	0,398 (NS)
CaCO3 (g/kg)	309,0 ± 13,4	304,0 ± 15,3	-	0,246 (NS)

## 4 – DISCUSSION

### 4.1. Discussion générale

L'étude a montré qu'il existe une dynamique générale de la végétation sur la toiture verte (TV) depuis sa mise en place via dépôts d'inoculum en 2016 jusqu'à son évaluation en 2022. Cette dynamique se marque notamment par une augmentation considérable du couvert végétatif ainsi qu'un changement au niveau du pool d'espèces observées. Au cours du temps, le nombre et l'abondance en espèces spontanées augmentent. Cependant, les espèces dominantes en 2016 ne sont pas les mêmes que celles observées en 2018 ou 2022 ce qui est en accord avec d'autres études (Brown et Lundholm 2015; Rowe, Getter, et Durhman 2012).

Globalement et au cours du temps sur la toiture, il y a une augmentation de la part des espèces spontanées mais celle-ci ne dépasse jamais celle des espèces typiques des tonsures de Crau que l'on retrouve sur la TV au cours du temps. Cette observation est contraire à celle d'une autre étude qui avait montré, qu'après 30 ans de mise en place d'une toiture verte intensive non gérée, la part d'espèces spontanées était plus importante (Catalano et al. 2016). Cependant et dans le cas présent de ce travail, il serait difficile d'affirmer avec certitude que les espèces « typiques des tonsures de Crau » qui n'étaient pas présentes en 2016 (ou 2018) et qui apparaissent en 2022 proviennent exclusivement des graines apportées par l'inoculation initiale et pas par les pelouses environnantes à la TV. En effet, la flore de La Crau n'est pas endémique (Buisson, Dutoit, et Wolff 2004), bien que l'association des tonsures d'où proviennent l'inoculum (*Crassuletum tillaea*) y soit particulière. L'apparition de ces « nouvelles » espèces pourrait donc être due à plusieurs sources possibles. Deux sources possibles sont avancées : a) certaines graines de l'inoculum étaient en dormance et attendaient les conditions favorables à leur germination pour germer (filtres (a)biotiques) ; b) la pluie de graines a apporté ces espèces sur la toiture verte (filtre de dispersion). Les pelouses environnantes et non l'inoculum en seraient donc la source. En effet, de nombreuses espèces inventoriées dans ces pelouses étaient communes à des espèces typiques des tonsures de Crau. On peut par exemple citer : *Crassula tillaea*, *Crepis sancta*, *Erodium cicutarium*, *Medicago truncatula*, *M. rigidula*, *Plantago lagopus*, *Ranunculus paludosus* et *Trifolium scabrum*. Pour savoir les espèces apparues en 2018 (et absentes en 2016) provenaient de l'inoculum de départ ou d'espèces spontanées, l'idéal serait d'étudier la dynamique « banque de graines-végétation » des tonsures de la Crau desquelles sont issues ces inocula afin de mieux comprendre les conditions qui modulent l'expression de la banque de graines au sein de la végétation en place.

Pour 2016 comme pour 2022, le facteur limitant principal au développement du couvert et de la richesse en espèces est la profondeur. C'est également l'un des facteurs abiotiques les plus stressants qui avait été mis en avant dans des études précédentes sur toitures vertes (Dunnnett, Nagase, et Hallam 2008; Young 2014). Elle doit être suffisamment grande afin que les plantes puissent s'y épanouir. Les quadrats inoculés possédaient également un couvert végétal significativement plus important que les non inoculés (en 2016 et en 2022). L'ensemencement initial des toitures vertes extensives par des espèces végétales adaptées aux conditions stressantes rencontrées sur ces toitures est d'ailleurs recommandé (Van Mechelen, Dutoit, et Hermy 2014; Catalano et al. 2016). Cependant, ces deux facteurs (profondeur, inoculation) n'expliquent pas tout.

Le climat et ses événements particuliers sont également responsables de la dynamique des communautés végétales sur la TV étudiée (Brown et Lundholm 2015; C. Thuring et Grant 2016). Il peut d'une part influencer la présence (absence) d'espèces sur la toiture et d'autre part interférer avec la réalisation complète du cycle de production des graines des plantes. Cette deuxième influence du climat est d'autant plus importante que la plupart des espèces inventoriées sur le toit sont annuelles et dépendent donc de la production de graines de la végétation en place pour se maintenir sur la

toiture. Afin d'assurer leur présence dans les temps, leur fructification doit être suffisamment rapide pour que leurs graines puissent germer l'année suivante (banque de graines transitoire). Or, le climat de la région méditerranéenne et les variations interannuelles des précipitations observées pourrait représenter une contrainte importante, conditionnant l'installation et le maintien (ou non) de la végétation en place ainsi que sa possibilité (ou non) d'avoir le temps de produire ses fruits, pourvoyeurs de graines. En 2018, les précipitations annuelles ont été plus importantes tout au long de l'année que vis-à-vis des moyennes annuelles couramment observées (1981-2010) pour la région (+220 mm) contrairement à 2016 (-140 mm) et 2017 (-350 mm) (infoclimat 2022). L'évolution de ces conditions environnementales a pu avoir un impact considérable sur la dynamique des communautés végétales de la toiture. En effet, la richesse spécifique sur la TV était plus importante en 2018 qu'en 2022 et en 2016.

L'étude de la banque de graines prend alors tout son sens. Il est intéressant de savoir ce que ce réservoir de biodiversité contient et quelle est sa similitude vis-à-vis de la végétation apparente observée. Les résultats ont montré que les espèces que l'on y retrouve sont bien différentes de celles que l'on rencontre sur la toiture verte en 2022. Les premières sont principalement spontanées tandis que les secondes sont surtout typiques des espèces retrouvées au sein des tonsures de Crau. Mais, étant donné que cette banque de graines a la capacité de reconstituer la végétation apparente en cas de perturbation (Hopfensperger 2007; Vanstockem, Vranken, et al. 2018), il est important de connaître sa composition et de la prendre en considération dans la dynamique d'une toiture extensive. Quant à *Poa bulbosa*, elle ne produit pas de graines. Il s'agit d'une espèce géophyte et elle est l'une des 12 espèces qui a pu se maintenir aux cours des 6 dernières années de la TVext. Cette Poaceae possède le recouvrement par espèce le plus important pour les années 2018 et 2022 (atteignant presque 12%).

La composition chimique des substrats peut elle aussi avoir un impact sur la végétation et sa dynamique. Entre 2016 et 2022, une augmentation importante et significative a été observée en termes de carbone, d'azote et du contenu en matière organique (MO). Dans le but de déterminer la quantité idéale de matière organique (de 0 à 6% de MO de la matière sèche) à prévoir pour la composition des substrats d'une toiture verte, Bates et al. (2015) ont découvert qu'au plus la MO était présente (étude de 0 à 6% de MO de la matière sèche), au plus le recouvrement végétatif était important. L'augmentation de la concentration en azote pourrait s'expliquer par la capacité fixatrice d'oxyde d'azote des nombreux trèfles (*Trifolium*) et luzernes (*Medicago*) retrouvées en 2022 sur la toiture et dont l'abondance de 2022 dépasse celle de 2016. L'augmentation en carbone et azote constatée au cours du temps a également été observée dans une autre étude sur TV (Mitchell, Emilsson, et Buffam 2021). La capacité d'échange cationique (CEC) ainsi que les concentrations en potassium entre 2016 et 2022 ont également augmentés. Selon Buffam et Mitchell (2015), les toitures vertes extensives se présentent comme des sources de phosphore et de carbone organique. Leur rôle de source pour le carbone serait d'autant moins important dans environnements très ensoleillés car la végétation y serait moins dense et donc moins apte à fixer de grandes quantités de carbone atmosphérique qu'au sein de TVext plus ombragées (Rivière et al., non publié). Selon Ampim et al. (2010) la source majeure de la CEC sur TV serait liée à la proportion argileuse et à la MO d'un substrat tandis que la présence de sable et de graviers (ou galets) ne contribuent pas à modifier la capacité de ce substrat à retenir les éléments essentiels pour la végétation (Ampim et al. 2010). L'interaction sol-plantes sur les TVext mériterait d'être plus amplement étudiée afin que les conditions chimiques et abiotiques que le sol impose à la végétation sur la toiture soient mieux comprises et optimisées pour cette dernière.

Enfin, la régulation de l'ensoleillement n'a pas fait l'objet de cette étude mais reste cependant intéressante à souligner pour la réussite et le maintien d'une TVext en climat méditerranéen. Buckland-Nicks, Heim, et Lundholm (2016) soulignent d'ailleurs qu'elle permettrait d'observer une hétérogénéité spatiale clé au maintien et à l'augmentation du couvert végétal des toitures vertes extensives. L'ensoleillement pourrait par exemple être régulé via la mise en place de zones d'ombrages telles que des arbres (Köhler, 2006) ou des panneaux solaires (Shafique, Luo, et Zuo 2020) afin de diversifier les espèces végétales des TV. Également, la disponibilité en eau et l'effet de ses variations interannuelles sur la dynamique de la végétation devrait être étudiée.

#### 4.2. Retour sur expérience et perspectives

L'apparition de nouvelles espèces au sein de la toiture au cours du temps pourrait provenir de deux sources (inoculum, espaces verts environnants) étant donné que certaines espèces sont communes aux deux environnements. Des études sur la dynamique banque de graines-végétation des tonsures de Crau devraient être menées afin de mieux comprendre les paramètres régulant ces communautés. De plus, du fait de la proximité des quadrats entre eux et de la petite taille (1m x 1m) de ces derniers, il n'est pas impossible que des transferts de graines inter-quadrats au sein de la toiture verte (TV) ait eu lieu. L'exactitude de l'étude de la richesse spécifique de ces quadrats en fonction du facteur inoculum pourrait donc être compromise.

Aussi et du fait des variations interannuelles du climat, plusieurs relevés de végétation devraient être envisagés afin de tenter d'inventorier au mieux la végétation apparente sur le toit. En effet, fin mars 2022, une partie de la végétation était déjà asséchée et son identification s'est avérée plus complexe. De plus, certaines espèces telles que le *Portulaca oleracea* peuvent apparaître plus tard au sein de la végétation et risqueraient de ne pas être relevés par ce fait. Enfin, la phénologie de production des graines par les plantes devrait être prise en compte (abondance par espèce) afin d'évaluer la potentialité qu'ont ces espèces en une année  $t$  de produire des graines utiles au maintien de cette espèce à l'année  $t+1$ . Enfin, étant donné que la toiture étudiée n'est pas irriguée, il serait intéressant de mettre en lien les hauteurs de précipitations saisonnières avec les périodes de fructification des espèces annuelles sur la toiture verte afin de tenter de comprendre le lien qui unit ces deux événements. Il aurait également été intéressant d'étudier la banque de graines en 2018 afin de voir si les espèces de cette dernière auraient été plus corrélées à celles retrouvées au niveau de la végétation apparente du fait de la richesse spécifique importante relevées pour cette année.

Bien qu'ayant été résilientes jusqu'ici, le futur des communautés végétales n'en reste pas moins aussi certain au vu des potentiels perturbations auxquels la toiture pourrait faire face dans un contexte de changement climatique (sécheresse plus précoce et plus longues notamment). Il serait alors intéressant de tester la résilience d'autres espèces telles que des géophytes étant donné qu'elles possèdent des organes de réserves qui leur permettent de rester en état de dormance lorsque les conditions ne sont pas favorables. Selon Nagase et Dunnett (2013), ces espèces seraient donc capables de se maintenir dans le temps sur une toiture verte extensive et sont adaptées à des conditions climatiques stressantes telles que rencontrées dans les régions arides ou méditerranéennes dont elles proviennent. L'implantation de ce type d'espèces sur les TVext pourrait permettre d'obtenir une richesse spécifique moins dépendante du climat (Nagase et Dunnett 2013) que celle actuellement observée au sein de la toiture verte au vu des nombreuses espèces annuelles qui y sont présentes.

### 4.3. Implications à la mise en œuvre des TVext

La profondeur du sol est un facteur contribuant à la réussite de l'installation et le maintien de la végétation sur la toiture verte (TV). Au plus les substrats sont profonds, au moins les plantes qui y vivent subiront de stress. Le type de substrat employé est également un élément important pour le succès de ces TV. Une juste proportion entre éléments nutritifs et structurants doit être trouvée dépendamment du type de végétation visé, du climat, de l'ensoleillement ainsi que des conditions hydriques auxquelles la végétation devra faire face. L'hypothèse de l'habitat analogue s'avère utile dans le choix d'espèces adaptées à ces conditions (a)biotiques (Van Mechelen et al. 2014). L'ensemencement est une option couramment utilisée dans la mise en place des toitures végétales et a fait ses preuves bien qu'il faille accepter qu'un enrichissement par des espèces spontanées ait lieu au cours du temps (Catalano et al. 2016). Des espèces géophytes pourraient être employées pour diversifier de façon durable la toiture verte. Des espèces telles que : l'Iris (*Iris lutescens*), le Crocus (*Crocus sativus*), des Muscari (*Muscari neglectum* et *Muscari azureum*), la Narcisse (*Narcissus dubius assognus*), voire même des orchidées (*Himantoglossum robertinum*), etc pourraient donc être implantées sur les TVext des climats méditerranéens. Nagasse & Dunnett (2013) soulignent également l'intérêt d'apporter des espèces le plus diversifiées (d'un point de vue de leur traits fonctionnels) possible lors de la phase d'installation d'une TVext étant donné que des conditions (micro)environnementales redirigeront et sélectionneront toujours les espèces les plus adaptées au cours du temps. La création de microclimats au sein de la toiture verte (par la diversification des conditions d'ensoleillement, de profondeur, ..) permettrait également d'augmenter la biodiversité et la résilience de la toiture verte. Enfin, l'irrigation d'une toiture verte extensive pourrait être envisagée par un système d'irrigation provenant d'« eaux grises » afin de minimiser l'impact écologique de cette irrigation tout en optimisant l'évapotranspiration des plantes et donc l'isolation thermique du bâtiment ainsi que la réduction de l'effet d'îlot de chaleur bien connu au sein des villes.



## 5 – CONCLUSION

En définitive, la communauté végétale de la toiture est résistante et résiliente face aux conditions environnementales qui lui ont été imposées depuis sa mise en place. Entre 2016 et 2022, son couvert végétal ainsi que sa richesse spécifique n'ont cessé de s'accroître. Le transfert d'inoculum semble fonctionner et perdurer au sein de la végétation en place au cours du temps étant donné que la part de ces espèces de tonsures observées reste toujours supérieure à la part des espèces spontanées au cours du temps. Le succès de la création et du maintien des communautés végétales sur la toiture est donc plutôt positif (recouvrement, richesse spécifique et proportion d'espèces typiques de Crau) et d'autant plus marqué que les substrats étudiés sont profonds (richesse spécifique et recouvrement végétatif plus important). Cependant, son avenir pourrait être compromis en cas de perturbation du milieu car la banque de graines, principalement composées d'espèces non typiques des tonsures de Crau, ne permettrait pas de reconstituer la communauté actuellement observée au niveau de la végétation en place sur la toiture. Les variations interannuelles des précipitations semblent jouer un rôle sur la richesse spécifique annuelle de la végétation de la toiture et cet aspect est à investiguer. L'implantation d'espèces géophytes représente une option envisageable parmi d'autres pour pallier aux menaces qui pèsent sur le futur de cette végétation majoritairement annuelle. D'autres études seraient nécessaires pour comprendre l'impact de l'augmentation (diminution) de la concentration des paramètres chimiques (C, N, K, P, ..) sur la végétation en place et inversement. Finalement l'analyse de type multi-compartimentale des toitures vertes extensives est recommandée pour comprendre de façon intégrative les interactions et les dynamiques temporelles régissant le fonctionnement du système afin de l'optimiser.

## 6 – CONTRIBUTION PERSONNELLE

J'affirme avoir effectué la récolte des données de végétation de 2022 à l'aide des botanistes et scientifiques suivants : Elise Buisson, Thierry Dutoit, Grégory Mahy, Hervé Ramone, Clémentine Mutillod, Léo Rocher, Camilla Crifò, Emile Melloul, Christel Vidaller et Martin Meyer. La récolte des échantillons de substrats et de banque de graines se sont effectuées avec Thierry Dutoit. La mise en condition de germination de la banque de graines ainsi que l'arrosage régulier des banques de graines en serre ont été effectuées par mes soins après que mon co-promoteur m'en ait montré un exemple. La détermination des espèces de la banque de graines s'est également déroulée avec mon co-promoteur T. Dutoit. Les données antérieures à 2022 proviennent de Julie Chenot et ont dû être homogénéisées vis-à-vis de celles de 2022 (nom des espèces, seuil des pourcentages de recouvrement, etc).

A mi-parcours, un poster scientifique (présent en annexe) a été réalisé avec des résultats préliminaires et anciens à propos de la toiture verte (TV) étudiée. Ce dernier a été présenté au colloque d'EcoVeg15.

J'ai pu réaliser des ACP grâce à l'appui de Christel Vidaller et des PCoA ainsi que certains traitements statistiques grâce à l'appui Lucie Rivière. L'ensemble des graphiques, schémas et tableaux ont été produits par moi-même.

La rédaction de ce rapport est personnelle et enrichie par les discussions que j'ai pu avoir avec mes encadrants ainsi que des relectures et feedbacks plus ponctuels de Grégory Mahy.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allen, E. B., et M. F. Allen. 1986. « WATER RELATIONS OF XERIC GRASSES IN THE FIELD: INTERACTIONS OF MYCORRHIZAS AND COMPETITION ». *New Phytologist* 104 (4): 559-71. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1986.tb00656.x>.
- Allison, L. E. 1965. « Organic Carbon ». In *Agronomy Monographs*, édité par A. G. Norman, 1367-78. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c39>.
- Ampim, Peter A.Y., John J. Sloan, Raul I. Cabrera, Derald A. Harp, et Fouad H. Jaber. 2010. « Green Roof Growing Substrates: Types, Ingredients, Composition and Properties ». *Journal of Environmental Horticulture* 28 (4): 244-52. <https://doi.org/10.24266/0738-2898-28.4.244>.
- Arbid, Yara, Claire Richard, et Mohamad Sleiman. 2021. « Towards an Experimental Approach for Measuring the Removal of Urban Air Pollutants by Green Roofs ». *Building and Environment* 205 (novembre): 108286. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108286>.
- Azeñas, V., J. Cuxart, R. Picos, H. Medrano, G. Simó, A. López-Grifol, et J. Gulías. 2018. « Thermal Regulation Capacity of a Green Roof System in the Mediterranean Region: The Effects of Vegetation and Irrigation Level ». *Energy and Buildings* 164 (avril): 226-38. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.010>.
- Bates, Adam J., Jon P. Sadler, Richard B. Greswell, et Rae Mackay. 2015. « Effects of Varying Organic Matter Content on the Development of Green Roof Vegetation: A Six Year Experiment ». *Ecological Engineering* 82 (septembre): 301-10. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.102>.
- Bentsink, Léonie, et Maarten Koornneef. 2008. « Seed Dormancy and Germination ». *The Arabidopsis Book* 6 (janvier): e0119. <https://doi.org/10.1199/tab.0119>.
- Benvenuti, Stefano, et Davide Bacci. 2010. « Initial Agronomic Performances of Mediterranean Xerophytes in Simulated Dry Green Roofs ». *Urban Ecosystems* 13 (3): 349-63. <https://doi.org/10.1007/s11252-010-0124-9>.
- Bevilacqua, Piero, Domenico Mazzeo, Roberto Bruno, et Natale Arcuri. 2016. « Experimental Investigation of the Thermal Performances of an Extensive Green Roof in the Mediterranean Area ». *Energy and Buildings* 122 (juin): 63-79. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.062>.
- Bevilacqua 2017. « Surface Temperature Analysis of an Extensive Green Roof for the Mitigation of Urban Heat Island in Southern Mediterranean Climate ». *Energy and Buildings* 150 (septembre): 318-27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.081>.
- Bianchini, Fabricio, et Kasun Hewage. 2012. « How “Green” Are the Green Roofs? Lifecycle Analysis of Green Roof Materials ». *Building and Environment* 48 (février): 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.019>.
- Blank, Lior, Amiel Vasl, Shay Levy, Gary Grant, Gyongyver Kadas, Amots Dafni, et Leon Blaustein. 2013. « Directions in Green Roof Research: A Bibliometric Study ». *Building and Environment* 66 (août): 23-28. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.017>.
- Booth, Barbara D., et Clarence J. Swanton. 2002. « Assembly Theory Applied to Weed Communities ». *Weed Science* 50 (1): 2-13. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)050\[0002:AIATAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0002:AIATAT]2.0.CO;2).
- Bossuyt, Beatrijs, et Martin Hermy. 2004. « Seed Bank Assembly Follows Vegetation Succession in Dune Slacks ». *Journal of Vegetation Science* 15 (4): 449-56. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2004.tb02283.x>.
- Bossuyt, Beatrijs, et Olivier Honnay. 2008. « Can the Seed Bank Be Used for Ecological Restoration? An Overview of Seed Bank Characteristics in European Communities ». *Journal of Vegetation Science* 19 (6): 875-84. <https://doi.org/10.3170/2008-8-18462>.
- Braaker, Sonja, Martin Karl Obrist, Jaboury Ghazoul, et Marco Moretti. 2017. « Habitat Connectivity and Local Conditions Shape Taxonomic and Functional Diversity of Arthropods on Green

- Roofs ». Édité par Kim Cuddington. *Journal of Animal Ecology* 86 (3): 521-31. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12648>.
- Brown, Charlotte, et Jeremy Lundholm. 2015. « Microclimate and substrate depth influence green roof plant community dynamics ». *Landscape and Urban Planning*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204615001474>.
- Buckland-Nicks, Michael, Amy Heim, et Jeremy Lundholm. 2016. « Spatial Environmental Heterogeneity Affects Plant Growth and Thermal Performance on a Green Roof ». *Science of The Total Environment* 553 (mai): 20-31. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.063>.
- Buffam, Ishi, et Mark E. Mitchell. 2015. « Nutrient Cycling in Green Roof Ecosystems ». In *Green Roof Ecosystems*, édité par Richard K. Sutton, 223:107-37. Ecological Studies. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-14983-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14983-7_5).
- Buisson, Elise, Thierry Dutoit, et Axel Wolff. 2004. « Bilan de trente années de recherches en écologie dans la steppe de Crau (Bouches-du-Rhône, sud-est de la France) ». *Ecologia mediterranea* 30 (1): 7-24. <https://doi.org/10.3406/ecmed.2004.1492>.
- Cameron, Ross W.F., Jane E. Taylor, et Martin R. Emmett. 2014. « What's 'Cool' in the World of Green Façades? How Plant Choice Influences the Cooling Properties of Green Walls ». *Building and Environment* 73 (mars): 198-207. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.005>.
- Catalano, Chiara, Corrado Marcenò, Vito Armando Laudicina, et Riccardo Guarino. 2016. « Thirty Years Unmanaged Green Roofs: Ecological Research and Design Implications ». *Landscape and Urban Planning* 149 (mai): 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.01.003>.
- Cavanaugh, Laura M. 2008. « Redefining the Green Roof ». *Journal of Architectural Engineering* 14 (1): 4-6. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0431\(2008\)14:1\(4\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0431(2008)14:1(4)).
- Chen, Deliang, et Hans Weiteng Chen. 2013. « Using the Köppen Classification to Quantify Climate Variation and Change: An Example for 1901–2010 ». *Environmental Development* 6 (avril): 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2013.03.007>.
- Chenot, Julie. 2018. « Végétalisation écologique des toits en climat méditerranéen sans apport d'eau », 52.
- Chowdhury, Rezaul K., et Jameelu S. Abaya. 2018. « An Experimental Study of Greywater Irrigated Green Roof Systems in an Arid Climate ». *Journal of Water Management Modeling*. <https://doi.org/10.14796/JWMM.C437>.
- Christoffoleti, P.J., et R.S.X. Caetano. 1998. « Soil seed banks ». *Scientia Agricola* 55 (spe): 74-78. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161998000500013>.
- Drake, Donald R. 1998. « Relationships among the Seed Rain, Seed Bank and Vegetation of a Hawaiian Forest ». *Journal of Vegetation Science* 9 (1): 103-12. <https://doi.org/10.2307/3237228>.
- Dunnett, Nigel, Ayako Nagase, et Adrian Hallam. 2008. « The Dynamics of Planted and Colonising Species on a Green Roof over Six Growing Seasons 2001–2006: Influence of Substrate Depth ». *Urban Ecosystems* 11 (4): 373-84. <https://doi.org/10.1007/s11252-007-0042-7>.
- Dusza, Yann, Sébastien Barot, Yvan Kraepiel, Jean-Christophe Lata, Luc Abbadie, et Xavier Raynaud. 2017. « Multifunctionality Is Affected by Interactions between Green Roof Plant Species, Substrate Depth, and Substrate Type ». *Ecology and Evolution* 7 (7): 2357-69. <https://doi.org/10.1002/ece3.2691>.
- Dvorak, Bruce, et Astrid Volder. 2010. « Green Roof Vegetation for North American Ecoregions: A Literature Review ». *Landscape and Urban Planning* 96 (4): 197-213. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.04.009>.
- Fai Chow, Ming, et Ahmad Aiman Bin Ahmad Azlan. 2020. « Assessing the Performance of Bio Compost as Soil Media in Extensive Green Roof ». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 713 (1): 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/713/1/012012>.
- Froment, Celine. 2017. « Arthropods communities on green roofs in Brussels: Influence of the roof vegetation and landscape context », 42.
- Getter, Kristin L., et D. Bradley Rowe. 2006. « The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development ». *HortScience* 41 (5): 1276-85. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.5.1276>.

- Gonsalves, Sydney, Olyssa Starry, Alexander Szallies, et Stephan Brenneisen. 2022. « The Effect of Urban Green Roof Design on Beetle Biodiversity ». *Urban Ecosystems* 25 (1): 205-19. <https://doi.org/10.1007/s11252-021-01145-z>.
- Heerd, G. N. J. Ter, G. L. Verweij, R. M. Bekker, et J. P. Bakker. 1996. « An Improved Method for Seed-Bank Analysis: Seedling Emergence After Removing the Soil by Sieving ». *Functional Ecology* 10 (1): 144. <https://doi.org/10.2307/2390273>.
- Heim, Amy, et Jeremy Lundholm. 2014. « Species Interactions in Green Roof Vegetation Suggest Complementary Planting Mixtures ». *Landscape and Urban Planning* 130 (octobre): 125-33. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.07.007>.
- Henry, Frédéric. 2009. « Frédéric Henry, Origine et dynamique à long terme d'un écosystème herbacé pseudostéppique, le cas de la plaine de La Crau (Bouches-du-Rhône, France), Thèse d'université soutenue le 9 décembre 2009 à l'université Paul Cézanne de Marseille ». *ecologia mediterranea* 36: 4.
- Hopfersperger, Kristine N. 2007. « A Review of Similarity between Seed Bank and Standing Vegetation across Ecosystems ». *Oikos* 116 (9): 1438-48. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15818.x>.
- Jim, C.Y. 2017. « Green Roof Evolution through Exemplars: Germinal Prototypes to Modern Variants ». *Sustainable Cities and Society* 35 (novembre): 69-82. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.001>.
- Joshi, M. Y., L. Rivière, G. Mahy, et J. Teller. 2021. « EFFECTIVENESS OF GREEN ROOFS IN STRENGTHENING ECOLOGICAL NETWORK ». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVI-4/W1-2021* (septembre): 51-54. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W1-2021-51-2021>.
- Köhler, Manfred. 2006. « Long-Term Vegetation Research on Two Extensive Green Roofs in Berlin » 4 (1): 24.
- Ksiazek-Mikenas, Kelly, John Herrmann, Sean B Menke, et Manfred Köhler. 2018. « If You Build It, Will They Come? Plant and Arthropod Diversity on Urban Green Roofs Over Time », n° 1: 21.
- Li, W.C., et K.K.A. Yeung. 2014. « A Comprehensive Study of Green Roof Performance from Environmental Perspective ». *International Journal of Sustainable Built Environment* 3 (1): 127-34. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2014.05.001>.
- Lionello, P., P. Malanotte-Rizzoli, R. Boscolo, P. Alpert, V. Artale, L. Li, J. Luterbacher, et al. 2006. « The Mediterranean Climate: An Overview of the Main Characteristics and Issues ». In *Developments in Earth and Environmental Sciences*, 4:1-26. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1571-9197\(06\)80003-0](https://doi.org/10.1016/S1571-9197(06)80003-0).
- Lundholm, Jeremy T. 2006. « Green Roofs and Facades: A Habitat Template Approach » 4 (1): 16.
- Lundholm, Jeremy T, et Emily A Walker. 2018. « Evaluating the Habitat-Template Approach Applied to Green Roofs », n° 1: 13.
- Madre, Frédéric, Alan Vergnes, Nathalie Machon, et Philippe Clergeau. 2014. « Green Roofs as Habitats for Wild Plant Species in Urban Landscapes: First Insights from a Large-Scale Sampling ». *Landscape and Urban Planning* 122 (février): 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.012>.
- Magill, John D., Karen Midden, John Groninger, et Matthew Therrell. 2011. « A History and Definition of Green Roof Technology with Recommendations for Future Research », 69.
- Mitchell, Mark E., Tobias Emilsson, et Ishi Buffam. 2021. « Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Variation along a Green Roof Chronosequence: Implications for Green Roof Ecosystem Development ». *Ecological Engineering* 164 (juin): 106211. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106211>.
- Nagase, Ayako, et Nigel Dunnett. 2010. « Drought Tolerance in Different Vegetation Types for Extensive Green Roofs: Effects of Watering and Diversity ». *Landscape and Urban Planning* 97 (4): 318-27. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.07.005>.

- Nagase et al. 2013. « Performance of Geophytes on Extensive Green Roofs in the United Kingdom ». *Urban Forestry & Urban Greening* 12 (4): 509-21. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.06.005>.
- Oberndorfer, Jeremy Lundholm, Brad Bass, Reid R. Coffman, Hitesh Doshi, Nigel Dunnett, Stuart Gaffin, Manfred Köhler, Karen K. Y. Liu, et Bradley Rowe. 2007. « Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services ». *BioScience* 57 (10): 823-33. <https://doi.org/10.1641/B571005>.
- Onésimo, Cecilia M. G., Diego D. Dias, Marina Beirão, Alessandra R. Kozovits, et Maria Cristina T. B. Messias. 2021. « Ecological Succession in Areas Degraded by Bauxite Mining Indicates Successful Use of Topsoil ». *Restoration Ecology* 29 (1). <https://doi.org/10.1111/rec.13303>.
- Orrock, John L., Cory C. Christopher, et Humberto P. Dutra. 2012. « Seed Bank Survival of an Invasive Species, but Not of Two Native Species, Declines with Invasion ». *Oecologia* 168 (4): 1103-10. <https://doi.org/10.1007/s00442-011-2159-x>.
- Papafotiou, Maria, Niki Pergialioti, Lamprini Tassoula, Ioannis Massas, et Georgios Kargas. 2013. « Growth of Native Aromatic Xerophytes in an Extensive Mediterranean Green Roof as Affected by Substrate Type and Depth and Irrigation Frequency ». *HortScience* 48 (10): 1327-33. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.10.1327>.
- Perelli, Ginevra A. 2014. « Characterization of the Green Roof Growth Media ». Milano: Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale.
- Pittaluga, Ilaria, Corrado Schenone, et Davide Borelli. 2012. « Sound Absorption of Different Green Roof Systems ». In , 015005. San Diego, California. <https://doi.org/10.1121/1.3685875>.
- Poórová, Zuzana, et Zuzana Vranayová. 2015. « GREEN ROOF VEGETATION POSSIBILITIES », 4.
- Rieux, R., G. Ritschel, et G. Roux. 1977. « Molinier-Tallon-1949\_1977\_etude-ecologique-et-phytosociologique-du-Crassuletum-tillaeae\_revue-de-biologie-et-d-ecologie-de-mediterranee.pdf ». In *Etude écologique et phytosociologique du Crassuletum tillaea Molinier et Tallon 1949*, 4:117-43. 3. Revue de biologie et d'écologie méditerranéenne.
- Rowe, D. Bradley, Kristin L. Getter, et Angela K. Durhman. 2012. « Effect of Green Roof Media Depth on Crassulacean Plant Succession over Seven Years ». *Landscape and Urban Planning* 104 (3-4): 310-19. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.11.010>.
- Sellier, A. 2021. « Toiture verte et dynamique de végétation : Etude de la banque de graines de la toiture verte du TERRA », 48.
- Shafique, Muhammad, Xiaowei Luo, et Jian Zuo. 2020. « Photovoltaic-Green Roofs: A Review of Benefits, Limitations, and Trends ». *Solar Energy* 202 (mai): 485-97. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.101>.
- Sparks, D.L. 1996. *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods*. Soil Science Society of America Book Series. SSSA. <https://books.google.be/books?id=Fz-8tQEACAAJ>.
- Thomas, G. W. 1996. « Soil PH and Soil Acidity ». In *SSSA Book Series*, édité par D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, et M. E. Sumner, 475-90. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>.
- Thompson, Ken, Jan P. Bakker, et Renie M. Bekker. 1997. *The Soil Seed Banks of North West Europe : Methodology, Density and Longevity*. Vol. 276. Cambridge: Cambridge University Press.
- Thompson, Ken, Roberta M. Ceriani, Jan P. Bakker, et Renée M. Bekker. 2003. « Are Seed Dormancy and Persistence in Soil Related? » *Seed Science Research* 13 (2): 97-100. <https://doi.org/10.1079/SSR2003128>.
- Thuring, Christine E., et Nigel P. Dunnett. 2019. « Persistence, Loss and Gain: Characterising Mature Green Roof Vegetation by Functional Composition ». *Landscape and Urban Planning* 185 (mai): 228-36. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.10.026>.
- Thuring, Christine, et Gary Grant. 2016. « The Biodiversity of Temperate Extensive Green Roofs – a Review of Research and Practice ». *Israel Journal of Ecology and Evolution* 62 (1-2): 44-57. <https://doi.org/10.1080/15659801.2015.1091190>.

- Valkó, Orsolya, Balázs Deák, Péter Török, Katalin Tóth, Réka Kiss, András Kelemen, Tamás Miglécz, Judit Sonkoly, et Béla Tóthmérész. 2021. « Dynamics in Vegetation and Seed Bank Composition Highlight the Importance of Post-restoration Management in Sown Grasslands ». *Restoration Ecology* 29 (S1). <https://doi.org/10.1111/rec.13192>.
- Van Mechelen, Carmen, Thierry Dutoit, et Martin Hermy. 2014. « Mediterranean Open Habitat Vegetation Offers Great Potential for Extensive Green Roof Design ». *Landscape and Urban Planning* 121 (janvier): 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.09.010>.
- Van Mechelen. 2015. « Adapting Green Roof Irrigation Practices for a Sustainable Future: A Review ». *Sustainable Cities and Society* 19 (décembre): 74-90. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.007>.
- Van Mechelen, Carmen, Thierry Dutoit, Jens Kattge, et Martin Hermy. 2014. « Plant Trait Analysis Delivers an Extensive List of Potential Green Roof Species for Mediterranean France ». *Ecological Engineering* 67 (juin): 48-59. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.043>.
- Vandvik, Vigdis, Kari Klanderud, Eric Meineri, Inger E. Måren, et Joachim Töpper. 2016. « Seed Banks Are Biodiversity Reservoirs: Species–Area Relationships above versus below Ground ». *Oikos* 125 (2): 218-28. <https://doi.org/10.1111/oik.02022>.
- Vannucchi, Francesca, Alice Buoncristiano, Manuele Scatena, Claudia Caudai, et Francesca Bretzel. 2022. « Low Productivity Substrate Leads to Functional Diversification of Green Roof Plant Assemblage ». *Ecological Engineering* 176 (mars): 106547. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106547>.
- Vanstockem, Jan, Christiaan Ceusters, Karen Van Dyck, Ben Somers, et Martin Hermy. 2018. « Is There More than Meets the Eye? Seed Bank Analysis of a Typical Novel Ecosystem, the Extensive Green Roof ». Édité par Jörg Ewald. *Applied Vegetation Science* 21 (3): 419-30. <https://doi.org/10.1111/avsc.12383>.
- Vanstockem, Jan, Liesbet Vranken, Brent Bleys, Ben Somers, et Martin Hermy. 2018. « Do Looks Matter? A Case Study on Extensive Green Roofs Using Discrete Choice Experiments ». *Sustainability* 10 (2): 309. <https://doi.org/10.3390/su10020309>.
- Vijayaraghavan, K. 2016. « Green Roofs: A Critical Review on the Role of Components, Benefits, Limitations and Trends ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57 (mai): 740-52. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>.
- Walck, Jeffrey L., Siti N. Hidayati, Kingsley W. Dixon, Ken Thompson, et Peter Poschlod. 2011. « Climate Change and Plant Regeneration from Seed: CLIMATE CHANGE AND PLANT REGENERATION ». *Global Change Biology* 17 (6): 2145-61. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02368.x>.
- Wang, Ning, Xinyue He, Fuwang Zhao, Dongli Wang, et Juying Jiao. 2020. « Soil Seed Bank in Different Vegetation Types in the Loess Plateau Region and Its Role in Vegetation Restoration ». *Restoration Ecology* 28 (S1). <https://doi.org/10.1111/rec.13169>.
- Willems, J. H. 1988. « Soil Seed Bank and Regeneration of a *Calluna Vulgaris* Community after Forest Clearing ». *Acta Botanica Neerlandica* 37 (2): 313-20. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1988.tb02139.x>.
- Willems, J.H., et L.P.M. Bik. 1998. « Restoration of High Species Density in Calcareous Grassland: The Role of Seed Rain and Soil Seed Bank ». *Applied Vegetation Science* 1 (1): 91-100. <https://doi.org/10.2307/1479088>.
- Williams, Nicholas S. G., Jeremy Lundholm, et J. Scott MacIvor. 2014. « FORUM: Do Green Roofs Help Urban Biodiversity Conservation? » Édité par Richard Fuller. *Journal of Applied Ecology* 51 (6): 1643-49. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12333>.
- Wooster, E.I.F., R. Fleck, F. Torpy, D. Ramp, et P.J. Irga. 2022. « Urban Green Roofs Promote Metropolitan Biodiversity: A Comparative Case Study ». *Building and Environment* 207 (janvier): 108458. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108458>.
- Young, Thomas. 2014. « The Influence of Green Roof Substrate Composition on Plant Growth and Physiological Health ».

