



Du modèle à l'aide à la décision par la modélisation : application à l'irrigation déficitaire des végétaux en ville, contexte France et Sénégal

Serigne Kosso Sene

► To cite this version:

Serigne Kosso Sene. Du modèle à l'aide à la décision par la modélisation : application à l'irrigation déficitaire des végétaux en ville, contexte France et Sénégal. Modélisation et simulation. Sorbonne Université, 2023. Français. NNT : 2023SORUS579 . tel-04496124

HAL Id: tel-04496124

<https://theses.hal.science/tel-04496124>

Submitted on 8 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Ecole doctorale : EDITE

THÈSE

Pour obtenir le grade de docteur délivré par

Sorbonne Université

Discipline Science et Technologies de l'Information et de la Communication

Spécialité : Informatique

Présentée et soutenue publiquement par :

Serigne Kosso SENE

Le 13 Décembre 2023

Du modèle à l'aide à la décision par la modélisation : Application à l'irrigation déficitaire des végétaux en ville, contexte France et Sénégal

Thèse dirigée par Nicolas MARILLEAU & Mathieu GUEYE

Membres du jury

Jean-Daniel Zucker	Président du jury	Directeur de recherche (HDR) à l'ummisco, Sorbonne université, IRD
Rémy Courdier	Rapporteur	Professeur au LIM – Université de la Réunion
Aboudou Raoufou Pierre Radji	Rapporteur	Professeur à l'université de Lomé, Togo
Marie-Laure BETBEDER	Examinateuse	Maître de conférence au DISC (institut FEMTO-ST), Université Franche-comté, Besançon
Nicolas MARILLEAU	Encadrant	Chercheur (HDR) à l'ummisco, Sorbonne université, IRD
Mathieu GUEYE	Encadrant	Directeur de recherche Ifan – UCAD, Dakar
Thomas BUR	Encadrant	Docteur, Directeur Technique à Urbasense, Versailles

Ummisco

Unité Mixte Internationale de Modélisation Mathématique et Informatique des Systèmes Complexes
IRD Bondy – 36 Avenue Henry Varagnat 93143 Bondy, France

À NDELLA & CHEIKHOUNA

Remerciements

Je tiens à prendre un moment pour exprimer ma sincère gratitude à tout ceux qui ont participé à la réalisation de cette thèse. Votre soutien, vos encouragements et votre présence tout au long de ce voyage ont été inestimables, et je souhaite vous remercier du plus profond de mon cœur.

Je tiens à remercier particulièrement l'ANRT pour le financement de cette thèse à travers le dispositif Cifre en collaboration avec l'entreprise Urbasense.

Aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail particulièrement aux rapporteurs Rémy Courdier et Aboudou Raoufou Pierre Radji, professeurs des universités. À M. Jean-Daniel Zucker directeur du laboratoire Ummisco qui me prodiguait beaucoup de conseils lors de mes séjours au labo et ce depuis mon stage en 2019.

Je souhaiterais remercier particulièrement Marie Laure maitresse de conférences à l'université de Franche-Comté pour le suivi à travers le comité mon travail pour avoir apporté des propositions d'amélioration. Aux autres membres du comité de suivi de la thèse qui m'ont fait l'honneur de m'accompagner durant cette thèse et m'ont prodigué de précieux conseils pour le bon déroulement de la thèse. Je veux citer Christophe Cambier et Diariétou Sambakhé.

À mes directeurs de thèse Nicolas Marilleau chercheur à l'IRD-Ummisco, Mathieu Gueye directeur de recherche titulaire à l'université Cheikh Anta Diop de Dakar et à mon encadrant scientifique de l'entreprise Dr Thomas Bur cofondateur de l'entreprise Urbasense, je vous remercie pour votre expertise, vos conseils éclairés et surtout votre patience infinie. Votre mentorat m'a guidé à travers les complexités de la recherche, m'a permis à repousser mes limites intellectuelles et m'a aidé à grandir en tant que chercheur. Merci Nicolas pour ton ouvert d'esprit, tu m'as accompagné à me former sur plusieurs thématiques en informatique sans jamais rien m'imposer.

Chacun d'entre vous a joué un rôle crucial dans la réussite de ce projet. Je n'oublierai jamais les moments très difficiles et de doutes mais vous avez été toujours là et vous avez toujours eu confiance en moi. Thomas merci pour l'accompagnement pendant les moments de turbulences.

À tous mes collègues doctorants au laboratoire Unité Mixte Internationale de Modélisation Mathématique et Informatique des Systèmes complexes de l'IRD à Bondy et au laboratoire Botanique à Dakar. Je voudrais remercier particulièrement Elisabeth pour l'accompagnement lors des missions et des démarches administratives.

À mes collègues à l'entreprise (à Jouy en jossas comme à Villeurbanne), je tiens à vous remercier pour les moments chalereux que nous avons passé ensemble, les collaborations fructueuses et le partage de connaissances qui ont enrichi mon travail. Votre soutien moral et professionnel a été une source d'inspiration constante. Mention spéciale à mes compagnons de bureau à Villeurbanne Celine, Marc, Manel et Thomas.

À mes parents, mes frères et soeurs, je vous suis reconnaissant pour votre amour indéfectible et votre soutien inconditionnel. Votre confiance en moi a été ma force tout au long de cette aventure académique.

À ma femme NDELLA, ton soutien sans faille, ta compréhension et ton amour incommensurable ont été mon ancre dans les moments de doute et de stress. Tu es ma source de motivation et ma raison de persévéérer. Merci d'avoir passé ces moments de hauts et de bas à mes côtés.

Enfin, à mon fils Cheikhouna qui vient de fêter ses deux ans, tu es ma plus grande source de joie. Ton sourire lumineux et ta curiosité infatigable m'ont rappelé l'importance de ce que je fais et m'ont donné la force de continuer et d'être un père exemplaire, tu es tout pour moi, mon fils.

Ensemble, vous avez fait de cette aventure de recherche un voyage mémorable. Ma thèse est le fruit de notre travail collectif, et je partage cette réussite avec chacun d'entre vous. Merci du fond du cœur pour votre soutien indéfectible.

Résumé

La gestion des espaces urbains est en constante évolution, passant de simples éléments ornementaux à des écosystèmes offrant une gamme étendue de services essentiels à l'homme et à l'environnement. Cependant, ces services ne sont pas sans coût, notamment en termes d'utilisation de l'eau. Dans ce contexte, les modèles agronomiques, bien que nombreux, ne constituent pas des outils complets d'aide à la prise de décision pour les professionnels des espaces verts urbains.

Pour répondre à ce défis, une approche intégrant la théorie de la décision et la modélisation des décisions a été développée. Cette démarche vise à combiner les connaissances scientifiques avec les contraintes opérationnelles spécifiques à chaque contexte. L'objectif est de fournir des scénarios précis et adaptés à chaque situation, en prenant en compte des facteurs de contraintes opérationnelles et les attentes des parties prenantes.

Un exemple concret de cette approche est le modèle agronomique SARa développé lors de cette étude, qui évalue l'activité racinaire des arbres en utilisant des mesures tensiométriques. Ce modèle permet de suivre en continu la reprise des arbres après transplantation, offrant ainsi une vision proactive plutôt que réactive de leur survie. Les paramètres SARa sont ensuite intégrés dans un outil d'aide à la prise de décision en matière d'irrigation déficiente.

En plus du modèle agronomique SARa, l'étude a également utilisé le modèle TeadXpert pour fournir des données sur plusieurs paramètres, tels que la réserve utile aux racines (RUR). Ces données ont été essentielles pour alimenter le processus de prise de décision en matière d'irrigation des espaces verts urbains. L'intégration de ces modèles, y compris SARa et TeadXpert, ainsi que l'approche basée sur la théorie de la décision et la modélisation des décisions, constitue une démarche holistique visant à améliorer la gestion des espaces verts urbains tout en optimisant l'utilisation de l'eau.

De plus, l'utilisation d'une ontologie a été explorée pour formaliser les connaissances dans le domaine de l'irrigation déficiente des espaces verts urbains en facilitant la communication entre les acteurs du domaine.

Cette étude met en évidence l'importance d'intégrer des modèles de systèmes complexes et des données de contraintes opérationnelles dans le développement d'outils d'aide à la décision pour les professionnels des espaces verts urbains. Cela permet de prendre en compte la réalité opérationnelle tout en exploitant les avancées scientifiques pour une gestion plus efficace et durable des végétaux en milieu urbain.

Mots clés : Modélisation, Aide à la décision, Théorie de la décision, Modélisation des décisions, Ontologie, Espace végétalisé urbain, Irrigation déficiente, agro-écologie, reprise, activité racinaire

Abstract

Urban green space management is constantly evolving, transitioning from mere ornamental elements to ecosystems that provide a wide range of essential services to both humans and the environment. However, these services are not without cost, particularly in terms of water use. In this context, agronomic models, while numerous, do not constitute comprehensive decision support tools for urban green space professionals.

To address this challenge, an approach that integrates decision theory and decision modeling has been developed. This approach aims to combine scientific knowledge with context-specific operational constraints. The goal is to provide precise and tailored scenarios for each situation, taking into account operational constraints and stakeholder expectations.

A concrete example of this approach is the SARa agronomic model developed in this study, which assesses root activity in trees using tensiometric measurements. This model allows for continuous monitoring of tree establishment after transplantation, offering a proactive rather than reactive view of their survival. SARa parameters are then integrated into a decision support tool for deficit irrigation.

In addition to the SARa agronomic model, the study also utilized the TeadXpert model to provide data on several parameters, such as the useful reserve at the roots (RUR). This data was crucial for informing the decision-making process regarding urban green space irrigation. The integration of these models, including SARa and TeadXpert, as well as the approach based on decision theory and decision modeling, constitutes a holistic approach aimed at improving the management of urban green spaces while optimizing water use.

Moreover, the use of an ontology was explored to formalize knowledge in the field of deficit irrigation of urban green spaces, facilitating communication among stakeholders in the field.

This study highlights the importance of integrating complex system models and operational constraint data in the development of decision support tools for urban green space professionals. This enables the consideration of operational realities while harnessing scientific advancements for more efficient and sustainable management of vegetation in urban environments.

Keywords : Modeling, Decision support, Decision theory, Decision modeling, Ontology, Urban green space, Deficit irrigation, Agro-ecology, Recovery, Root activity.

Table des matières

REMERCIEMENTS	III
RESUME	V
ABSTRACT.....	VI
TABLE DES MATIERES.....	VII
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES TABLEAUX.....	XV
INTRODUCTION GENERALE	1
CONTEXTE DE LA THESE.....	1
PROBLEMATIQUE.....	4
OBJECTIFS DE LA THESE.....	5
STRUCTURATION DE LA THESE	5
CHAPITRE 1 : LES VEGETAUX EN VILLE : PLACE, ROLES ET ENJEUX	8
1 EVOLUTION DU REGARD AUTOUR DU VEGETAL EN VILLE	9
1.1 VISION SERVICIELLE DE LA NATURE EN VILLE : CAS DU VEGETAL	10
1.1.1 <i>Du MEA (Millennium Ecosystem Assessment) aux ODD.....</i>	11
1.1.2 <i>Services écosystémiques du végétal en ville</i>	12
1.1.3 <i>Mesure des services rendus par le végétal en ville.....</i>	13
1.1.3.1 Mesures in situ des services écosystémiques.....	14
1.1.3.2 Outils et modèles pour mesurer des services écosystémiques	14
1.1.3.3 Monétisation et évaluation participative des services écosystémiques.....	15
1.1.4 <i>Gérer pour maximiser les services rendus.....</i>	15
1.2 TYPOLOGIE DES STRUCTURES VEGETAUX EN VILLE	16
1.3 DIFFERENCE CULTURELLE DU REGARD DU VEGETAL EN VILLE : FRANCE ET SENEGAL .	17
2 MILIEU DE DEVELOPPEMENT DU VEGETAL	19
2.1 SOL EN MILIEU URBAIN	19
2.2 CLIMAT URBAIN.....	21
2.3 INTERACTION SOL-VEGETATION-ATMOSPHERE.....	22
3 INSTALLATION DES JEUNES ARBRES EN VILLE	24

3.1	LES ACTEURS DE L'INSTALLATION DES ARBRES EN VILLE	24
3.2	FIABILISATION DES PLANTATIONS PAR LE CONTROLE DE LA REPRISE DES ARBRES	25
3.3	TECHNIQUES DE DETECTION DE REPRISES DES ARBRES	27
3.4	PRINCIPAUX SYSTEMES D'IRRIGATION DES ARBRES EN MILIEU URBAIN	29
CONCLUSION	30
CHAPITRE 2 : IRRIGATION EN MILIEU URBAIN	32
1 IRRIGATION DES VEGETAUX	33
1.1	EVOLUTION DES ECONOMIES D'EAU PAR LES SYSTEMES D'IRRIGATION ET LES MODES DE DECLENCHEMENT (STRATEGIES D'IRRIGATION)	33
1.2	IRRIGATION DES VEGETAUX EN VILLE	35
1.2.1	<i>Irrigation manuelle</i>	35
1.2.2	<i>Irrigation Automatique</i>	39
1.3	VERS DES RESTRICTIONS D'IRRIGATION FACE AU CHANGEMENT GLOBAL	41
1.4	VALORISATION DE L'EAU POUR L'IRRIGATION DES VEGETAUX EN VILLE	41
2 IRRIGATION DEFICITAIRE : ENJEUX ET CONCEPT	43
2.1	ENJEUX DE L'IRRIGATION DEFICITAIRE	43
2.2	DEFINITION DE L'IRRIGATION DEFICITAIRE	45
2.3	STRATEGIES D'IRRIGATION DEFICITAIRE	45
2.3.1	<i>Irrigation déficitaire régulée</i>	46
2.3.2	<i>Irrigation partielle des racines</i>	47
3 IRRIGATION DEFICITAIRE EN VILLE :	48
CONCLUSION	51
CHAPITRE 3 : DE LA DONNEE MULTIFACTORIELLE A L'AIDE A LA DECISION	53
1 VISION POLYSEMIQUE DE L'AIDE A LA DECISION	54
1.1	HISTORIQUE DE L'AIDE A LA DECISION.....	54
1.2	DEFINITION DE LA DECISION	55
1.3	DIFFERENTS TYPES DE DECISIONS : STRATEGIQUES, TACTIQUES ET OPERATIONNELLES	56
1.4	DEFINITION DE L'AIDE A LA DECISION	56
2 MODELISATION ET AIDE A LA DECISION	59

2.1 MODELES D'AIDE A LA DECISION	60
2.1.1 <i>Approche mécaniste</i>	61
2.1.2 <i>Approche statistique</i>	62
2.2 MODELISATION DES DECISIONS	64
2.3 ONTOLOGIES POUR LA FORMALISATION DES CONNAISSANCES	65
2.3.1 <i>Définition d'une ontologie</i>	65
2.3.2 <i>Intérêts de l'ontologie</i>	65
2.3.3 <i>Utilisation des ontologies</i>	66
2.3.4 <i>Intégration de l'ontologie dans un système d'aide à la décision</i>	67
2.4 ILLUSTRATION DE LA MODELISATION POUR L'AIDE A LA DECISION : ESTIMATION DES BESOINS EN EAU DES VEGETAUX EN VILLE	67
2.4.1 <i>Détermination de l'évapotranspiration réelle (ETr)</i>	69
2.4.2 <i>Evapotranspiration réelle par télédétection</i>	72
2.4.3 <i>Détermination des besoins en eau des végétaux par des capteurs</i>	73
CHAPITRE 4 : MODELISATION DE LA DYNAMIQUE RACINAIRE :	
PROPOSITION D'UNE METHODE D'EVALUATION DE LA REPRISE DES ARBRES URBAINS	77
INTRODUCTION.....	78
1 DONNEES UTILISEES DANS CETTE ETUDE.....	83
1.1 MATERIEL VEGETAL ET ZONES D'ETUDES	83
1.2 FACTEURS INFLUENÇANT LA REPRISE (SITE, VEGETAL, SOL ET CLIMAT).....	85
1.3 DISPOSITIF DE MESURE DE LA DISPONIBILITE DE L'EAU DANS LE SOL :	86
1.4 DONNEES RECUEILLIES DES DISPOSITIFS UTILISEES :	88
1.5 TRAITEMENT DES DONNEES BRUTES : NETTOYAGE ET LISSAGE	88
1.6 ANALYSES STATISTIQUES APPLIQUEES AUX DONNEES TRAITEES : TEST NON PARAMETRIQUE.....	89
1.7 DONNEES DES AVIS D'EXPERTS SUR LA REPRISE.....	89
2 CONSTRUCTION DU MODELE DE SUIVI D'ACTIVITE RACINAIRE (SARA)	
89	
2.1 MODELES DE CROISSANCE ET DE DEVELOPPEMENT RACINAIRE EXISTANTS.....	89
2.2 QUALIFICATION D'UNE ACTIVITE RACINAIRE	90
2.3 METHODE DE CONSTRUCTION DU MODELE SARA (<i>FIGURE 4. 4</i>) :.....	92

2.4 DETERMINATION DES PARAMETRES DU MODELE SARA	92
2.5 CALCUL D'INDICATEURS AVANCES DE LA REPRISE RACINAIRE.....	95
2.6 ANALYSES STATISTIQUES APPLIQUEES AUX RESULTATS DES INDICATEURS CALCULES : 95	
2.6.1 <i>Visualisation de la distribution des données</i>	95
2.6.2 <i>Application de l'analyse en composantes principales (ACP).....</i>	96
3 APPLICATION DU MODELE SARA	96
3.1 RESULTATS D'ANALYSES STATISTIQUES SUR LES INDICATEURS DE REPRISE.....	96
3.1.1 <i>Résultats de la visualisation de la distribution des données.....</i>	96
3.1.2 <i>Résultat de l'ACP.....</i>	101
3.2 RESULATS DE L'EVALUTION DE L'INDICATEUR NPA DU MODELE AVEC LES AVIS D'EXPERT SUR LA REPRISE.....	102
3.3 DISCUSSION DES RESULTATS DE L'EVALUATION DU MODELE.....	104
3.3.1 <i>Effet de l'eau du sol dans l'activité racinaire des arbres en milieu urbain</i>	104
3.3.2 <i>Méthodes de détection de l'activité racinaire des arbres urbains transplanté .</i>	105
3.3.3 <i>Evaluation précoce de la reprise racinaire des arbres urbains</i>	107
CONCLUSION.....	109
CHAPITRE 5 : CONSTRUCTION D'UN OUTIL D'AIDE A LA PRISE DE DECISION : APPLICATION A L'IRRIGATION DEFICITAIRE DES VEGETAUX EN VILLE.....	110
INTRODUCTION.....	111
1 OUTIL D'AIDE A LA PRISE DE DECISION (OAPD).....	112
1.1 ELICITATION DU PROCESSUS DE DECISION.....	113
1.1.1 <i>Production de connaissance via des modèles de systèmes complexes</i>	114
1.1.2 <i>Identification et évaluation de scénarii intéressants par des techniques de modélisation des décisions.....</i>	114
1.1.3 <i>Prise de décision et la rétroaction</i>	115
1.2 REPRESENTATION DES CONNAISSANCES PAR L'ONTOLOGIE	115
1.3 PROPOSITION D'UNE DEFINITION D'UN OAPD	116
2 MISE EN PLACE D'UN OAPD POUR L'IRRIGATION DEFICITAIRE DES VEGETAUX EN VILLE PAR LES ACTEURS DES ESPACES VERTS : CAS URBASENSE.....	116

2.1 MODELES D'IRRIGATION DES VEGETAUX URBAINS EXISTANTS	116
2.2 PARAMETRES NON MODELISABLES MAIS INDISPENSABLES POUR LA PRISE DE DECISION A L'IRRIGATION DES VEGETAUX EN VILLE	118
2.3 APPLICATION A L'IRRIGATION DEFICITAIRE DES VEGETAUX URBAINS.....	119
2.3.1 <i>Détermination et intégration des règles de décisions d'arrosage des arbres urbains à partir du modèle d'intégration</i>	120
2.3.2 <i>Technique d'apprentissage pour automatiser les décisions d'arrosages.....</i>	125
2.3.3 <i>Construction d'une ontologie de l'irrigation déficitaire des végétaux en ville .</i>	127
2.3.4 <i>Intégration des jeux d'acteurs</i>	128
CONCLUSION.....	129
CONCLUSION GENERALE	132
CONCLUSION SUR LA MODELISATION ET L'AIDE A LA PRISE DE DECISION	132
CONCLUSION SUR L'APPLICATION A L'IRRIGATION DEFICITAIRE DES VEGETAUX EN VILLE .	133
PERSPECTIVES	135
ANNEXES	137
URBASENSE.....	137
UMMISCO-IRD.....	138
LABORATOIRE BOTANIQUE-IFAN	138
EXPERIMENTATIONS ET LES TRAVAUX LORS DE LA THESE.....	138
DISPOSITIF EXPERIMENTAL X SONDES SUR LES JEUNES ARBRES.....	139
PROJET GARIBALDI : EXPERIMENTATION SUR LE POUVOIR RAFRAICHISSANT DE LA VEGETATION : REQUALIFICATION DE LA RUE GARIBALDI A LYON	141
PROJET GRENOBLE : JARDIN BIOCLIMATIQUE	144
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	147

Liste des figures

Chapitre I :

FIGURE 1. 1 : SCHEMA REPRESENTATIF DE L'EVOLUTION DE LA PRISE EN COMPTE DES ESPACES VEGETALISES DANS LES THEORIES ET LES PRATIQUES URBAINES (DU XXE AU XXI ^{EME} SIECLE) (MEHDI ET AL., 2012).....	12
FIGURE 1. 2 : STRATES DE LA VEGETATION EN ESPACE URBAIN (JULLIEN & JULLIEN, 2011)	17
FIGURE 1. 3 : LES DIFFERENTS TYPES DE SOLS PRESENTS AUTOUR DE LA VILLE DE LYON ET SA ZONE BLANCHE DEFINISSANT LES SOLS URBAINS. (GROUPEMENT D'INTERET SCIENTIFIQUE SUR LES SOLS (GIS SOL) – RESEAU MIXTE TECHNOLOGIQUE SOLS ET TERRITOIRES, 2019). ..	21
FIGURE 1. 4 : ÎLOT DE CHALEUR URBAIN : LA TEMPERATURE DE L'AIR EN VILLE ET MILIEU RURAL	22
FIGURE 1. 5: DESSIN REPRESENTANT LES CONDITIONS MICROCLIMATIQUES D'UN ARBRE PLANTE EN RUE EN COMPARAISON AVEC UN ARBRE EN MILIEU FORESTIER (BOURGERY & MAILLIET, 1993).	24
FIGURE 1. 6 : PRESENTATION GENERALE DE L'ENVIRONNEMENT DE PLANTATION D'UN ARBRE EN VILLE (SOURCE : (GOURRIEREC, 2012)).....	27

Chapitre II :

FIGURE 2. 1 : ARROSAGE DES ARBRES PAR UN CAMION-CITERNE AU CENTRE-VILLE DE LYON, RUE GARIBALDI (PHOTOS PRISES PAR KOSSO SENE LE 10/07/2023)	37
FIGURE 2. 2 : TUYAU D'ARROSAGE AVEC LE COMPTEUR D'EAU AU PIED D'UN ARBRE (PHOTO PRISE PAR KOSSO SENE LE 10/07/2023).....	38
FIGURE 2. 3 : SUIVI D'ARROSAGE DE JEUNES ARBRES URBAINS A AIX EN PROVENCE AU SUD DE LA FRANCE (PHOTO PRISE PAR KOSSO SENE LE 26/05/2021)	40
FIGURE 2. 4 : EXEMPLE DE DEPLOIEMENT DE SYSTEMES D'IRRIGATION AUTOMATIQUE DANS LA MOTTE ET A L'EXTERIEUR DE LA MOTTE (PHOTO 1 : SYSTEME GOUTTE A GOUTTE DANS MOTTE ET SYSTEME RWS 90CM A L'EXTERIEUR DE LA MOTTE ; PHOTO 2 : SYSTEME RWS 90CM A L'EXTERIEUR DE LA MOTTE ; PHOTO 3 : SYSTEME GOUTTE A GOUTTE DANS LA MOTTE ET A L'EXTERIEUR).....	40

Chapitre III :

FIGURE 3. 1 : LES DIFFERENTS NIVEAUX DE DECISION (IGOR ANSOFF, 1987)	56
FIGURE 3. 2 : PERIMETRE DECISIONNEL DU DECIDEUR	59
FIGURE 3. 3 : ILLUSTRATION DES DIFFERENTES METHODES DE DETERMINATIONS DE L'EVAPOTRANSPIRATION.....	69

FIGURE 3. 4 : RESERVE EN EAU DU SOL ET LA VARIATION DE LA CAPACITE DE RETENTION D'EAU ET DU POINT DE FLETRISSEMENT (RESERVE UTILE) EN FONCTION DE LA TEXTURE DU SOL.	74
Chapitre IV	
FIGURE 4. 1 : REPARTITION DES ARBRES SUIVIS PAR REGION ET PAR GENRE ; LES GENRES REPRESENTEES DANS CETTE FIGURE REPRESENTENT LES ESPECES LES PLUS SUIVIS PAR REGION. LES ARBRES SUIVIS SONT PLUS MAJORITAIREMENT PRESENTS EN REGION PARISIENNE. LE NOM DES GENRES SONT ABREGES A LEURS TROIS PREMIERES LETTRES, PAR EXEMPLE QUERCUS = QUE ET PLATANE = PLA.....	85
FIGURE 4. 2 : SCHEMA DE DISPOSITION DES SONDES AU PIED DE L'ARBRE	87
FIGURE 4. 3 : EXTRAIT DE COURBES DE SUIVI DE L'EVOLUTION DE LA TENSION DE L'EAU (EN CBAR) DANS LE SOL D'UN ARBRE SUIVI ; LA SONDE 1 (JAUNE) INSTALLEE DANS LA MOTTE (25CM DE PROFONDEUR) ; LA SONDE 2 (VERTE) INSTALLEE DANS LA FOSSE DE PLANTATION A 40CM DU PIED DE L'ARBRE (25CM DE PROFONDEUR) ; LA SONDE 3 (VIOLETTE) INSTALLEE DANS LA FOSSE DE PLANTATION A 40CM DU PIED DE L'ARBRE (75CM DE PROFONDEUR)...	91
FIGURE 4. 4 : LES DIFFERENTES ETAPES DE LA METHODE DE SUIVI D'ACTIVITE RACINAIRE (SARA) ; ETAPE 1 : APPLICATION D'UN SEUIL DE TENSION A PARTIR DUQUEL IL Y A POSSIBLEMENT UN DEBUT D'ACTIVITE RACINAIRE (1) ; ETAPE 2 : CALCUL DE LA VITESSE D'ASSECHEMENT DU SOL ET APPLIQUER UN SEUIL DE LA VITESSE D'ASSECHEMENT DU SOL A PARTIR DUQUEL IL Y A POSSIBLEMENT UNE ACTIVITE RACINAIRE (2) ; ETAPE 3 : IDENTIFICATION DES PERIODES D'ASSECHEMENT DU SOL DONT LA DUREE EST SUPERIEURE A UN TEMPS DONNE. (3).....	94
FIGURE 4. 5 : DISTRIBUTION DES ARBRES SUR LA RELATION ENTRE LE NOMBRE DE PERIODES D'ACTIVITES RACINAIRES (NPA) AU NIVEAU DE CHAQUE SONDE EN FONCTION DE L'ANNEE DE SUIVI. LE NPA DES ARBRES EN PREMIERE ANNEE EST SIGNIFICATIVEMENT PLUS IMPORTANTE DANS LA MOTTE QU'EN SOL DE PLANTATION.	98
FIGURE 4. 6 : DISTRIBUTION DES ARBRES SUR LA RELATION ENTRE LE NOMBRE DE JOURS D'ACTIVITES RACINAIRES (NJA) AU NIVEAU DE CHAQUE SONDE EN FONCTION DE L'ANNEE DE SUIVI.	99
FIGURE 4. 7 : DISTRIBUTION DES ARBRES SUR LA RELATION ENTRE LA SOMME DES INTENSITES D'ACTIVITES RACINAIRES (SIA) AU NIVEAU DE CHAQUE SONDE EN FONCTION DE L'ANNEE DE SUIVI.	100
FIGURE 4. 8 : RESULTAT DE L'ACP SUR LES INDICATEURS D'ACTIVITES RACINAIRES (ANNEE : L'ANNEE DE SUIVI, NPA : NOMBRE DE PERIODES D'ACTIVITES, NJA : NOMBRE DE JOURS	

D'ACTIVITES, SIA : SOMME D'INTENSITE DES ACTIVITES, NJL : NOMBRE JOURS AU-DELA DE LA LIMITE DE MESURE DE LA SONDE).	102
FIGURE 4. 9 : DISTRIBUTION DES ARBRES SUR LA RELATION ENTRE L'INDICATEUR NPA AU NIVEAU DE CHAQUE SONDE EN FONCTION DES AVIS DONNES PAR LES EXPERTS SUR LA REPRISE DE CHAQUE EN PREMIERE ANNEE DE SUIVI. LA MEDIANE DES BOXPLOTS DU NPA DES ARBRES AYANT UNE BONNE NOTE DE REPRISE EST SUPERIEURE PAR RAPPORT A LA MEDIANE DES AUTRES.....	103
FIGURE 4. 10 : DISTRIBUTION DES SUJETS SUR LA RELATION ENTRE LE NOMBRE DE PERIODES D'ACTIVITES AU NIVEAU DE CHAQUE SONDE EN FONCTION DES AVIS DONNES PAR LES EXPERTS SUR LA REPRISE DE CHAQUE EN PREMIERE ANNEE DE SUIVI. LA MEDIANE DES BOXPLOTS DU NOMBRE DE PERIODES D'ACTIVITES RACINAIRES DES SUJETS AYANT UNE BONNE NOTE DE REPRISE EST TRES IMPORTANTE PAR RAPPORT A LA MEDIANE DES AUTRES BOXPLOTS AVEC UNE MAUVAISE REPRISE (ALERTE). LA MEDIANE DES BOXPLOTS DES SUJETS QUI ONT UNE NOTE ALERTE EST EGALE A 0.....	104
Chapitre V :	
FIGURE 5. 1 : PROPOSITION D'UNE ARCHITECTURE POUR CONSTRUIRE UN OUTIL D'AIDE A LA PRISE DE DECISION	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE 5. 2 : ARCHITECTURE DE L'OAPD A L'IRRIGATION DES VEGETAUX URBAINS PROPOSE	120
FIGURE 5. 3 : ARBRE DE DECISION A L'IRRIGATION DEFICITAIRE DES ARBRES URBAINS	127
FIGURE 5. 4 : REPRESENTATION DE DIFFERENTS CONCEPTS UTILISES DANS LA CONSTRUCTION DE L'ONTOLOGIE DE L'IRRIGATION DES VEGETAUX EN VILLE.....	128
Annexes :	
FIGURE ANNEXE 1 : INSTALLATION DU DISPOSITIF DES 27 SONDES AU PIED DES ARBRES NOUVELLEMENT TRANSPLANTES AU CHATOU EN ILE DE FRANCE (A - ESSENCE : PRUNUS, DISPOSITIF INSTALLE LE 22/01/2021 ; B – ESSENCE : QUERCUS, DISPOSITIF INSTALLE LE 22/01/2021 ; C – ESSENCE : PINUS, DISPOSITIF INSTALLE LE 26/03/2021).....	140
FIGURE ANNEXE 2 : SCHEMA D'EMPLACEMENT DES 27 SONDES AU PIED DE L'ARBRE	141
FIGURE ANNEXE 3 : SCHEMA DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL SUR LA RUE GARIBLDI, WL : RESERVE D'EAU, SH : SONDES TENSIOMETRIQUES, MD : CAPTEURS DENDROMETRIQUES, FT : MINI STATION METEO.....	143
FIGURE ANNEXE 4 : VUE DE LA RUE GARIBALDI (SOURCE : METROPOLE LYON).....	143

Liste des tableaux

CHAPITRE II

TABLEAU 2. 1 : LES SYSTEMES D'IRRIGATION AUTOMATIQUE.....	40
Chapitre IV	
TABLEAU 4. 1 : EXTRAIT DES GENRES LES PLUS REPRESENTIFS ET PAR REGION	84
TABLEAU 4. 2 : MATRICE DE COMPARAISON DES DIFFERENCES DE SIGNIFICATIVITE DES NPA DES ARBRES REPRESENTES SUR LA BOITE A MOUSTACHE ENTRE LES POINTS DE MESURE (S1, S2, S3) AVEC LES ANNEES DE SUIVIS (A1, A2, A3).	98
TABLEAU 4. 3 : MATRICE DE COMPARAISON DES NJA DES ARBRES REPRESENTES SUR LA BOITE A MOUSTACHE ENTRE LES POINTS DE MESURE (S1, S2, S3) AVEC LES ANNEES DE SUIVIS (A1, A2, A3).....	99
TABLEAU 4. 4 : MATRICE DE COMPARAISON DES SIA DES ARBRES REPRESENTES SUR LA BOITE A MOUSTACHE ENTRE LES POINTS DE MESURE (S1, S2, S3) AVEC LES ANNEES DE SUIVIS (A1, A2, A3).....	100

Chapitre V

TABLEAU 5. 1 : TABLE DES VARIABLES DE SORTIES DES DEUX MODELES (SARA ET TEADXPERT)	120
TABLEAU 5. 2 : TABLE DE DECISION REALISEE AVEC DES EXPERTS AGRONOMIQUES QUI PRECONISENT DES DECISIONS D'ARROSAGE AUX GESTIONNAIRES DES ESPACES VERTS..	121
TABLEAU 5. 3 : TABLE DES VARIABLES DE SORTIES DES DEUX MODELES (SARA ET TEADXPERT) ET DE LA METEO (PLUIE)	122
TABLEAU 5. 4 : TABLE DE DECISION REALISEE AVEC DES EXPERTS AGRONOMIQUES INTEGRANT LE MODELE METEO (PLUIE).....	122
TABLEAU 5. 5 : TABLE DES VARIABLES DE SORTIES DES DEUX MODELES (SARA ET TEADXPERT), DE LA METEO (PLUIE) ET DES DONNEES DE CONTRAINTES OPERATIONNELLES.....	123
TABLEAU 5. 6 : TABLE DE DECISION REALISEE AVEC DES EXPERTS AGRONOMIQUES INTEGRANT LE MODELE METEO (PLUIE) ET DES PARAMETRES DE CONTRAINTES OPERATIONNELLES ..	123
TABLEAU 5. 7 : JEU DE DONNEES UTILISEES POUR REALISER L'ARBRE DE DECISION.....	124
TABLEAU 5. 8 : GAIN D'INFORMATION DE CHAQUE CARACTERISTIQUE.....	126

Introduction Générale

Contexte de la thèse

Les prélevements mondiaux d'eau continuent d'augmenter en raison de la croissance démographique (OMM, 2022), des changements dans les modes de consommation et du manque d'attention accordée aux besoins des écosystèmes, créant ainsi un défi mondial de rareté de l'eau pour les générations futures (Schlosser et al., 2014). Les événements météorologiques extrêmes liés aux changements globaux entraînent une diminution des ressources en eau, et étant donné qu'après la FAO (2018) 70% de l'eau douce mondiale est utilisée pour l'irrigation, une gestion plus efficace de l'irrigation est essentielle pour répondre à la demande croissante. Cependant, dans les régions arides et semi-arides par exemple, où l'eau est limitée, fournir de l'eau aux plantes pour satisfaire leurs besoins devient un défi (J. C. Mailhol et al., 2004), nécessitant un changement de paradigme dans l'utilisation de l'eau et la production de cultures pour faire face aux perturbations climatiques.

Dans ce contexte de changement global, la mise en place de stratégies de gestion de l'eau efficaces sont essentielles pour garantir une production durable et la préservation des ressources hydriques dans les régions tempérées où l'eau n'est pas encore un facteur limitant. De nombreuses études (Cabelguenne et al., 1995; Fereres & Soriano, 2007; J. Zhang et al., 2021; Saad et al., 2023) proposent déjà des stratégies optimales pour une utilisation efficiente de l'eau, et cette préoccupation s'étend également à l'environnement urbain, où les infrastructures vertes peuvent contribuer à la conservation de l'eau en adoptant des approches d'irrigations comme l'irrigation déficiente pour soutenir les services écosystémiques fournis (Cabrera et al., 2013; Hartin et al., 2018; Alvarez et al., 2019; Tapparo et al., 2019; Mohamadzade et al., 2021; Schütt et al., 2022; Cheng et al., 2023). L'irrigation déficiente, largement utilisée en agriculture pour économiser l'eau, suscite de plus en plus d'intérêt en milieu urbain.

Cette stratégie peut permettre à une gestion durable de l'eau dans les environnements urbains souvent soumis à des restrictions favorisées par des périodes de sécheresse de plus en plus fréquentes et prolongées. Par exemple, en 2022, plusieurs départements français ont imposé aux entreprises de paysage de respecter les arrêtés préfectoraux sur la sécheresse, qui ont strictement interdit l'irrigation des espaces verts, entraînant ainsi une forte mortalité des végétaux (UNEP, 2022). De même, certaines régions du nord de l'Italie, du Portugal et de l'Espagne ont également annoncé des mesures d'urgence interdisant l'arrosage des espaces

verts et demandant à leurs habitants d'économiser leur consommation d'eau (Agence France Presse, 2022).

En effet, les services écosystémiques fournis par les végétaux en milieu urbain ont un coût notamment en termes d'usage de l'eau. L'irrigation est toujours utilisée, par exemple, durant la phase d'installation des jeunes arbres nouvellement transplantés. Selon l'espèce et la configuration du lieu, cet apport peut être prolongé et systématisé pour maintenir en vie les arbres dans un environnement contraint. Les anciens arbres ont pu développer dans plusieurs cas des systèmes racinaires permettant d'atteindre des sources d'eau profondes et éloignées du sol pour faire face à la disponibilité limitée de l'eau du sol en milieu urbain (Clark & Kjelgren, 1990; Thomsen et al., 2020). Contrairement aux derniers, les jeunes arbres nouvellement transplantés dépendent fortement de la disponibilité de l'eau du sol, durant la phase d'installation pour assurer leur pérennité, compte tenu de leurs systèmes racinaires initialement limités dans la motte (Clark et Kjelgren, 1990, Konijnendijk et al., 2005). Dans l'ensemble, le taux de mortalité est majoritaire chez les jeunes arbres dans les trois premières années suivant la transplantation (Gilbertson et Bradshaw, 1990, Lu et al., 2010, Roman et al., 2014 ; Miller et Miller, 1991 ; Roman et al., 2013).

Ces jeunes arbres ont donc besoin d'être irrigués en plus de l'approvisionnement de l'eau (pluie, naturel...) du sol (Konijnendijk et al., 2005, Bréda et al., 2006, Granier et al., 2007, Allen et al., 2010, Moser et al., 2016, Puhlmann etq al., 2019) durant cette phase critique pour assurer la reprise racinaire, l'ancrage dans leur nouvel environnement et pour surtout minimiser le risque de mort prématurée. Selon l'espèce et le site d'implantation, les apports nécessitent un bon suivi pour assurer la viabilité des arbres et économiser la ressource en eau. En plus, les systèmes d'arrosages sont rarement intégrés, ce qui rend encore les interventions fastidieuses compte tenu des moyens logistiques et humains à mettre en place. La maîtrise de l'irrigation est alors essentielle durant cette phase (Kaoser et al, 2014). En plus des besoins accrus des arbres nouvellement transplantés en termes d'eau, les événements caniculaires vécus en Europe ces dernières années replacent la question de l'irrigation des végétaux des espaces verts au centre des préoccupations sociales : arroser des végétaux pour assurer leur reprise (Gilman et al., 2013) mais aussi les arroser durant une canicule pour dans certaines conditions amplifier leur effet rafraîchissant (Cheung et al., 2021).

Pléthore d'études (Rao et al., 2016; Alvarez et al., 2019; Sánchez-Blanco et al., 2019) rapportent que l'application de l'irrigation déficitaire en milieu urbain peut présenter plusieurs

avantages. Par exemple, elle favorise la reprise des arbres nouvellement plantés en les soumettant à un stress hydrique contrôlé, ce qui les pousse à développer leur système racinaire plus profonds et à devenir plus robustes face aux variations de l'approvisionnement en eau et aux conditions climatiques changeantes. Cette approche permet d'économiser de l'eau, de réduire les coûts en évitant des apports unitules et des passages, dans le cas de l'irrigation manuelle, non opportuns. Cependant, il est important de suivre l'état hydrique de ces arbres, de prendre en compte leurs besoins spécifiques et les conditions environnementales afin d'éviter les effets néfastes de l'irrigation déficitaire. Les avancées technologiques ont contribué à cet égard (Canales-Ide et al., 2019). Par exemple, des systèmes d'irrigation intelligents utilisant des capteurs avancés peuvent surveiller en temps réel les conditions du sol, les niveaux d'humidité et les prévisions météorologiques, ajustant automatiquement les paramètres d'irrigation pour une utilisation plus efficace de l'eau (Guntur et al., 2022; Pramanik et al., 2022; Vera et al., 2021).

Ainsi, les acteurs des espaces verts doivent évoluer vers une prise en compte davantage de l'ensemble de l'écosystème face au changement climatique. Une bonne maîtrise de l'arrosage est d'ores et déjà préoccupante chez les jeunes arbres pour garantir une bonne reprise et réduire considérablement le taux de mortalité mais aussi de participer à l'effort d'économie de l'eau. Ainsi, les apports d'eau doivent être étudiés sur des bases objectives et non empirique pour aider les professionnels des espaces verts et les collectivités à maîtriser l'irrigation pour des raisons d'éthiques mais aussi budgétaire. En effet, l'irrigation en ville engendre une part très importante dans la gestion des jeunes arbres urbains. Dans la plupart des plantations, l'arrosage est compliqué car le système d'arrosage n'est pas intégré. Dans ce cas pour arroser, il faut mobiliser de la main d'œuvres, de la logistique (camion-citerne) et planifier les tournées.

Il existe des dispositifs pour accompagner les acteurs dans cette prise de décision. Parmi ces dispositifs, il y a ceux utiliser pour surveiller l'état hydrique du sol, au plus près des racines permettant de piloter l'humidité du sol des jeunes arbres urbains. Par exemple, les capteurs tensiométriques (Tron, ISBERIE, et al., 2013), qui fournissent des données permettant de mettre en évidence les excès et les manques d'eau dans le sol, de suivre l'état de dessèchement des différents horizons du sol de plantation et dans certains cas d'évaluer l'eau disponible pour les racines. En plus de la gestion économe de l'eau d'irrigation que procure ces données, elles peuvent être utilisées pour évaluer l'activité racinaire et par conséquent la réussite de la reprise de l'arbre dans son environnement de transplantation. Il est ainsi nécessaire de promouvoir des outils d'aide à la décision alliant capteurs, modèles et tout autre paramètre pouvant influencer

la décision mais aussi de prendre en compte le processus décisionnel pour permettre aux opérationnels d'assurer une irrigation déficitaire mesurée à l'intersection des enjeux économiques, environnementales et de santé publique.

Problématique

La modélisation embrasse d'ores et déjà cette problématique par la proposition de modèles agronomiques (reposant sur les mathématiques et l'informatique) qui reproduisent le sol, la plante et leur dynamique. Ces modèles jouent un rôle essentiel en fournissant des bases scientifiques pour comprendre les systèmes complexes. Plusieurs approches de modélisation, telles que l'approche mécaniste et l'approche statistique, sont utilisées pour analyser et prédire des phénomènes complexes dans divers domaines. Ces modèles jouent un rôle central et fondamental dans la prise de décision dans de nombreux domaines, des sciences physiques à la biologie en passant par la météorologie. Ils permettent de mieux comprendre les systèmes complexes, d'explorer des hypothèses et de tester des scénarios pour éclairer les décisions. Cependant, ces modèles ont des limites en termes de flexibilité et d'adaptabilité aux situations réelles. Ils sont souvent axés sur des questions scientifiques spécifiques et ne tiennent pas toujours compte des contraintes pratiques et des attentes des parties prenantes.

Dans le domaine opérationnel, les résultats des modèles seuls peuvent sembler insuffisants, car la réalité est souvent plus complexe. Les modèles scientifiques constituent la première étape de la construction d'un outil d'aide à la prise de décision. L'aide à la décision nécessite plus qu'un modèle scientifique. Les gestionnaires des espaces verts sont confrontés à des défis pratiques tels que les réglementations, les attentes des citoyens et d'autres facteurs qui ne sont pas pris en compte par les modèles traditionnels. Par conséquent, l'outil doit combiner des modèles scientifiques avec une gamme de paramètres pratiques pour refléter la réalité opérationnelle. Ainsi, la construction d'un véritable outil d'aide à la prise de décision nécessite une approche holistique. Il faut tenir compte de l'utilisation de la théorie de la décision et des techniques de modélisation de décisions en plus des modèles biophysiques pour répondre aux besoins des gestionnaires. Ainsi, l'aide à la décision va au-delà des modèles scientifiques et exige une approche intégrée qui tienne compte des réalités opérationnelles et des préférences des parties prenantes pour aboutir à la construction d'outils d'aide à la prise de décision efficaces.

Objectifs de la thèse

L’ambition de cette thèse est d’accompagner les acteurs des espaces verts en apportant des avancées scientifiques. Pour ce faire, nous avons identifié les défis scientifiques et mené des recherches documentaires dans la littérature pour faire des contributions significatives. L’intérêt est de valoriser et de mettre en production les fruits de cette recherche. Dans le cadre de thèse, les travaux se sont orientés sur l’accompagnement des acteurs (gestionnaires, experts, agronomes, élus...) dans la prise de décision à l’irrigation déficiente des végétaux en ville. Les travaux de cette thèse visent les objectifs suivants :

- Concevoir un modèle capable, à partir des données tensiométriques, de comprendre et de prédire le comportement des racines des arbres urbains afin d’anticiper la reprise durant les trois années consécutives suivant la transplantation. Il s’agit d’une démarche proactive pour assurer la survie des arbres nouvellement transplantés.
- Construire un outil d’aide à la prise de décision à l’irrigation déficiente des végétaux en ville visant à faciliter la prise de décision et en tenant compte de la théorie de la décision. L’objectif de l’outil est de générer des recommandations ou des scénarios basés sur des modèles, en prenant en compte à la fois les données historiques et en temps réel, ainsi que les contraintes et les préférences des acteurs impliqués.

Structuration de la thèse

Les travaux de cette thèse sont structurés en cinq chapitres dont les trois premiers présentent un panorama de la littérature sur les végétaux en ville, les stratégies d’irrigation et les démarches de mises en place et les outils pour accompagner les décideurs dans la prise de décision. Les deux derniers représentent les contributions scientifiques de la thèse.

Chapitre I. Les végétaux en ville : place, rôles et enjeux

Les végétaux en ville jouent un rôle essentiel à l’équilibre de notre écosystème et à notre bien-être. Ils procurent beaucoup d’effets positifs à l’être humain à travers les espaces végétalisés qui remplissent des fonctions bénéfiques à l’environnement et à la santé humaine. Ce chapitre s’intéresse à l’évolution de la place, du rôle et de l’enjeu du végétal dans les processus de mutations de la ville à travers les théories urbaines qui sont axées sur des choix idéologiques, la planification et les politiques urbaines sur la prise en compte progressive de la question du végétal en ville. L’objectif est de montrer l’importance des végétaux en ville et leur contribution à l’Homme et à l’environnement.

Chapitre II. Irrigation en milieu urbain

L'un des défis actuels et à venir, pour le secteur du végétal en ville est d'améliorer l'utilisation des ressources, notamment de l'eau. Les végétaux sont irrigués mais il est important de contrôler voire optimiser cet apport pour économiser l'eau mais aussi pour une meilleure implantation du végétal dans son milieu et l'irrigation déficiente est une solution. Ce chapitre traite l'importance de la gestion de l'eau en ville. Pour cela il est nécessaire de déployer des stratégies qui réduisent la consommation par l'irrigation sans entraver outre mesure la vitalité des plantes.

Chapitre III. De la donnée multifactorielle à l'aide à la décision

La modélisation embrasse d'ores et déjà la problématique de l'irrigation des végétaux par la proposition de modèles agronomiques. Mais ces modèles offrent souvent un regard scientifique sur le système qui est un point de vue inadapté dans le domaine opérationnel. Ainsi, il est important de promouvoir des outils d'aide à la prise décision alliant capteurs, modèles mais aussi d'autres paramètres opérationnels permettant aux professionnels d'assurer une irrigation déficiente mesurée à l'intersection des enjeux économiques, environnementales et de santé publique. Dans ce chapitre, nous avons passé en revue la conception des modèles existants et utilisés dans la décision d'irrigation, en même temps les systèmes pour la formalisation de la modélisation des décisions et de la théorie de la décision. Nous avons aussi présenté l'importance de la structuration sémantique solide des connaissances de l'irrigation des végétaux pour représenter les éléments du système.

Chapitre IV. Modélisation de la dynamique racinaire : Proposition d'une méthode d'évaluation proactive de la reprise des arbres urbains.

Les arbres urbains sont moins étudiés que la production agricole, pour pérenniser les plantations malgré les services fournis à l'homme et à l'environnement. Cependant, des progrès sont faits en utilisant la méthode de suivi tensiométrique pour suivre des arbres urbains nouvellement transplantés, montrant des résultats prometteurs malgré les nombreux facteurs influents. À court terme, les mesures d'humidité du sol pourraient aider à prédire le succès de la transplantation des arbres urbains. Ce chapitre contributif propose un modèle assurant une évaluation proactive de la reprise des arbres urbains après transplantation à partir des données tensiométriques. Le modèle est appliqué sur des données réelles fournies par l'entreprise Urbasense.

Chapitre V. Construction d'un Outil d'Aide à la Prise de Décision : Application à l'irrigation déficiente des végétaux en ville

Il est important de rappeler que les modèles, bien que puissants, ne représentent qu'une facette de la complexité de la prise de décision. Ainsi, de nombreux outils d'aide à la décision ont été construits dans le but d'améliorer les décisions d'irrigation, mais la plupart n'ont pas exploité une bonne connaissance des critères que les professionnels utilisent réellement pour prendre des décisions. Dans ce chapitre, nous proposons une démarche pour mettre en place un outil d'aide à la prise de décision à l'irrigation des végétaux en ville en s'appuyant sur des modèles scientifiques, mais également sur toute une gamme de paramètres pratiques qui déterminent la réalité opérationnelle en tenant compte de la théorie de la décision et de la modélisation des décisions.

Chapitre 1 : Les végétaux en ville : Place, Rôles et enjeux

1 Evolution du regard autour du végétal en ville

Depuis le XVIIe siècle, la question de la présence de la nature en ville, particulièrement celle du végétal suscite beaucoup de réflexion. Même si le végétal n'a jamais quitté la ville, sa présence, au moins symbolique, semble se renforcer et l'approche sur la question de sa place en ville évolue au fil du temps. Au milieu du XVIIIe siècle, le végétal est au cœur de l'aménagement des villes à travers les jardins irréguliers, dits "à l'anglaise", qui dominaient en France et une partie de l'Europe (Duris, 2007). A cette époque, il s'agissait des jardins imitant des paysages naturels dans toute leur complexité et masquant leurs artifices au promeneur. Les premières promenades publiques en ville sont appelées « cours » ou « mails » et leur usage était restreint aux catégories les plus respectables (Mathis & Pépy, 2017).

À la fin du XIXe siècle, l'urbanisation incohérente (non planifiée) a fait l'objet de réflexion sur le rôle du végétal en ville (Da cunha, 2009). Le végétal dans la ville a connu une évolution particulière tant dans les théories que dans les pratiques urbanistiques. Cette évolution attribuée au végétal est intrinsèque à l'essor technique, à l'émergence de nouvelles problématiques et à l'influence de certaines idéologies (Choay, 1965).

Selon Françoise Choay (1988) « théories de l'urbanisme », il y a deux types d'idéologies sur la façon d'aménager la ville. Il s'agit, d'une part, de l'urbanisme progressiste qui exige l'hygiène du point de vue d'un espace largement ouvert, troué de vides et de verdure. D'autre part, le modèle de l'urbanisme culturaliste qui privilégie les valeurs culturelles traditionnelles (Merlin & Choay, 1988) conservant l'état le plus sauvage de l'espace. Le végétal, à travers les parcs et jardins, a ainsi acquis une place importante pour les deux théories. Celle de la pensée hygiéniste commence à se focaliser aux conditions de vie déplorables de la classe ouvrière qui voit dans les formes urbaines naturelles un remède aux maux physiques, mais aussi sociaux voire moraux qui accablent les villes et à l'opposition ville-campagne.

De part de la place prépondérante donnée au végétal dans ces idéologies développées, deux grandes catégories ont été regroupées par Catherine de Vilmorin (1976) : en premier lieu, la catégorie de ceux qui prennent en compte le végétal comme précurseur de l'aménagement urbain, où le modèle urbain proposé est développé en fonction d'un important système de parcs et jardins, en second lieu, celles qui intègrent le végétal comme une infrastructure, qui vient compléter les fonctions rendues par les divers autres équipements urbains (voirie et stationnement, eau et canalisations, espaces collectifs aménagés et aires, etc.) (Mehdi et al., 2012).

À partir du XXe siècle, des recherches sur l'urbanisme fonctionnel menées par plusieurs spécialistes sous l'égide de Le Corbusier et d'Eugène Hénard aboutissent à la charte d'Athènes (de Vilmorin, 1976). La conclusion de la charte s'articule selon quatre fonctions dominantes dans les zones urbaines : habiter, travailler, circuler et récréer. Cela signifie que les cadres de vie et loisirs sont privilégiés dans ce type d'urbanisation. Malgré les critiques de la charte, elle a permis de montrer plusieurs problèmes d'un urbanisme harmonieux à résoudre. Dorénavant, à la place des considérations esthétiques qui déterminaient la construction d'une ville, la charte a permis de placer des raisons fonctionnelles au premier plan. Cependant, les espaces végétalisés ou plantés, quant à eux, n'ont pas bénéficié de cette nouvelle approche traitant uniquement des espaces construits et continuent d'être pris en compte en tant que décor urbain ou un simple espace de loisirs, sans fonction sociale (Merlin et Choay, 2009).

Pendant la seconde moitié du XXe siècle, malgré l'interrogation de plusieurs chercheurs et urbanistes sur le rôle du végétal en ville, la question reste restreinte à des services sociaux tenant compte essentiellement des seuls aspects esthétiques et hygiéniques des espaces verts. C'est dans cette perspective que Merlin et Choay avancent que : « *Durant les cinquante dernières années, les espaces verts publics urbains ont été considérés comme un équipement urbain au même titre que les autres, en oubliant que la plupart d'entre eux apportaient une réponse unique à une question unique (...) l'échec de ce type d'espace vert, purement et étroitement fonctionnel, est si évident que les utilisateurs les abandonnent, car la prise en compte des seuls besoins élémentaires a conduit à une uniformité affligeante* » (Merlin et Choay, 2009 : 360p). En d'autres termes, les espaces verts publics en milieu urbain ont été longtemps considérés comme de simples aménagements, négligeant leur capacité à offrir des solutions uniques à des problèmes spécifiques. Cependant, cette approche strictement fonctionnelle a souvent abouti à des espaces uniformes et peu attrayants, entraînant leur désertion par les usagers.

1.1 Vision servicielle de la nature en ville : cas du végétal

Dès le début du XXIe siècle, la prise en compte du rôle écologique des espaces verts commence à prendre place dans la planification urbaine au même titre que les fonctions sociales et urbanistiques (Figure 1. 1). Ainsi le concept « d'urbanisme écologique » commence à prendre forme au sein des décisions qui soutiennent les écosystèmes et en maintenant la biodiversité (Arrif et al., 2011; Layke et al., 2012).

1.1.1 Du MEA (Millennium Ecosystem Assessment) aux ODD

La conférence de l'Organisation des Nations Unies sur l'environnement et le développement en 1992 à Rio de Janeiro (Brésil) a permis d'adopter la déclaration sur la promotion du concept des droits et des responsabilités des pays dans le domaine de l'environnement (ONU, 1992). Dès lors, les chercheurs du monde entier commencent à s'interroger sur les avantages que l'humanité reçoit de la nature en tant que biens mais aussi services en s'appuyant sur les premiers travaux de plusieurs chercheurs (Costanza & Daly, 1992), (Perrings et al., 1992) et (Daily, 1997).

En 2005, un consortium a vu le jour regroupant 1 300 experts de plus de 95 pays impliqués dans l'étude la plus approfondie jamais réalisée sur les liens entre le bien-être humain et les écosystèmes mondiaux (Millennium ecosystem assessment, 2005). Il s'agit notamment des avantages directs tels que la nourriture, des avantages indirects tels que la régulation du climat, des avantages intangibles tels qu'un sentiment de bien-être. Sachant que les écosystèmes naturels et les avantages existent, et la conviction que nous continuons d'avoir la possibilité de bénéficier de biens et services dans le futur (Bateman et al., 2014). Dès lors, la prise en compte des espaces verts urbains par les politiques publiques a connu plusieurs évolutions et le passage de l'urbanisme fonctionnel à l'urbanisme écologique est initié. La perception des espaces verts comme étant uniquement un décor urbain commence à disparaître et ils sont considérés à partir de cette période comme un écosystème anthropisé (Mehdi et al., 2012) qui fournit des services bénéfiques à l'homme et à l'environnement.

Dans cette perspective de prise de conscience sur les bienfaits des écosystèmes en particulier les végétaux en ville, il est urgent de prendre des mesures pour les protéger et assurer un environnement durable (Gérardin et al., 2016). C'est l'un des objectifs phares de l'organisation des nations unies lors de son assemblée générale en septembre 2005 dans sa lutte contre les changements climatiques et en France en particulier (Figure 1. 1). L'adaptation des politiques de l'aménagement urbain aux changements climatiques se place au cœur des débats pour rendre les villes plus résilientes et durables.

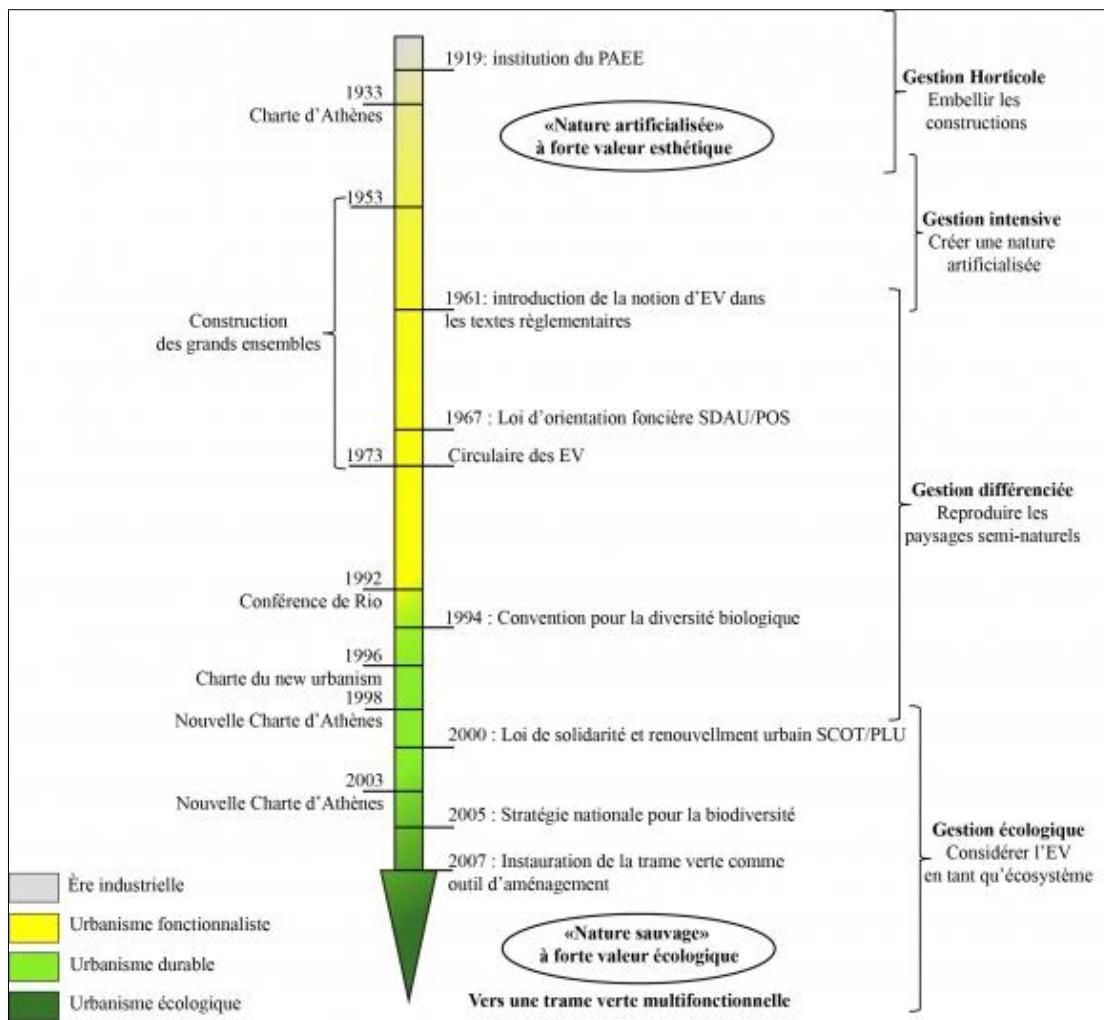


Figure 1. 1 : Schéma représentatif de l'évolution de la prise en compte des espaces végétalisés dans les théories et les pratiques urbaines (du XXe au XXI^{ème} siècle) (Mehdi et al., 2012)

1.1.2 Services écosystémiques du végétal en ville

Les végétaux jouent un rôle important en ville, tant sur le plan esthétique que sur le plan fonctionnel et environnemental en fournissant des services écosystémiques (Drew-Smythe et al., 2023; Escobedo et al., 2011; Nowak et al., 2014, 2018; Ungaro et al., 2022). Ils réalisent, en effet, plusieurs fonctions et services bénéfiques à l'environnement comme la séquestration du carbone, la préservation des espaces face à l'érosion ou la protection des habitats face aux catastrophes naturelles. Ils jouent aussi un rôle d'importance pour l'Homme, sa santé, par, notamment, (i) l'élimination des polluants atmosphériques, (ii) la purification de l'air, la réduction des îlots de chaleur, (iii) l'amélioration du développement cognitif (Escobedo et al., 2011 ; Nowak et al., 2014 ; Gillner et al., 2015 ; Mullaney et al., 2015 ; Livesley et al., 2016 ; Velasco et al., 2019).

Ils sont aujourd’hui considérés comme une alternative de premier plan pour s’adapter au dérèglement climatique dans nos villes (de Coninck et al., 2018). Les services fournis permettent d’atténuer les températures caniculaires causées par les effets du changement climatique grâce à l’ombrage et à la transpiration en fonction de la disponibilité d’eau dans le sol (Armson et al., 2013; Bowler et al., 2010; Rahman et al., 2017).

Les îlots de chaleur urbains sont actuellement un problème environnemental majeur en raison de l’urbanisation et de l’industrialisation croissantes. L’environnement thermique affecte non seulement le confort des citadins mais aussi leur santé (Jendritzky et Dear, 2009, Omonijo et al., 2013, Hui-Jiao et al., 2022). La végétation refroidit activement l’environnement par l’évaporation et la transpiration et passivement en ombrageant les surfaces qui autrement absorbent le rayonnement solaire. La nuit, le facteur de vue élevé du ciel des champs ouverts permet à la chaleur de s’échapper rapidement par le rayonnement, réduisant ainsi la température de l’air et augmentant l’humidité (Kleerekoper et al., 2012). Une couverture végétale étendue peut réduire considérablement la température de l’air ; ainsi, la végétation urbaine est nécessaire pour atténuer l’effet d’îlot de chaleur (Cui et al., 2020, Yan et al., 2018).

De plus, les végétaux absorbent le dioxyde de carbone (CO₂) et produisent de l’oxygène (O₂), ainsi ils contribuent à réduire la pollution atmosphérique. Ils absorbent également d’autres polluants atmosphériques, tels que les particules fines et les gaz toxiques (Y. Wang et al., 2021). Les espaces verts en ville peuvent fournir un habitat pour la faune et la flore urbaines, favorisant ainsi la biodiversité en milieu urbain (Escobedo et al., 2011). Les végétaux peuvent contribuer à améliorer le bien-être et la santé mentale des habitants de la ville, en offrant des espaces de détente et de loisirs, en éprouvant le stress et en fournissant une source de beauté et de contemplation (Nowak, 2018). Ils peuvent être utilisés pour améliorer l’esthétique de l’espace urbain, en particulier dans les zones résidentielles et commerciales, en ajoutant de la couleur et de la texture à l’environnement intégré.

En somme, les végétaux en milieu urbain sont des éléments importants de l’environnement urbain et leur présence peut améliorer considérablement la qualité de vie des habitants de la ville. C'est pourquoi, il est important de conserver les végétaux existants et d'en planter dans les zones urbaines.

1.1.3 Mesure des services rendus par le végétal en ville

Les végétaux en ville sont maintenant incontournables dans la planification urbaine et dans les politiques publiques visant à améliorer les conditions de vie des citadins mais aussi à préserver

l'environnement. Pour une meilleure prise en compte des végétaux en ville, il est important de pouvoir évaluer les bénéfices apportés en termes de services. Ainsi, la mesure des services écosystémiques rendus par les végétaux en ville peut être complexe, mais il existe plusieurs méthodes et approches couramment utilisées par les chercheurs et les praticiens pour mesurer ces services écosystémiques (Layne et al., 2012; Veerkamp et al., 2021; L. S. H. Lee et al., 2021; García-Pardo et al., 2022; Ai & Zhou, 2023; Klimanova et al., 2023).

*1.1.3.1 Mesures *in situ* des services écosystémiques*

Les chercheurs effectuent souvent des études sur le terrain pour évaluer les services écosystémiques spécifiques fournis par les végétaux en ville. Cela peut inclure la collecte de données sur la biodiversité, la quantité de biomasse, la capacité de séquestration du carbone, la qualité de l'air et de l'eau, la régulation thermique, etc. (Escobedo et al., 2019; Nowak, 2018). Ces mesures peuvent être effectuées à l'aide de techniques d'échantillonnage appropriées et d'équipements de mesure spécialisés.

En France, beaucoup études sur les services écosystémiques rendus par les végétaux en milieu urbain ont été menées à travers des appels à projet dans le cadre de l'ANR (agence nationale de la recherche). Plusieurs études sur le terrain sont réalisées découlant sur une acquisition importante de données permettant de mesurer les services attendus des végétaux. A titre d'exemple, le projet sTREEt (2021) qui mesure l'impact du stress des arbres urbains sur la qualité de l'air, le projet COOLTREES (2022), dont nous avons contribué dans le cadre de cette thèse, permettant d'évaluer et de modéliser l'évapotranspiration des arbres urbains en fonction de leur environnement, leur structure et leur réponse physiologique. Les données et modèles qui découlent de ces projets sont utiles aux gestionnaires pour quantifier les services écosystémiques rendus par la végétation et optimiser la gestion pour le développement des villes durables.

1.1.3.2 Outils et modèles pour mesurer des services écosystémiques

Des modèles informatiques sont également utilisés pour estimer les services écosystémiques rendus par les végétaux en ville (Moody et al., 2021). Ces modèles intègrent souvent des données sur la végétation, le climat, la topographie et d'autres paramètres environnementaux pour prédire les résultats (Veerkamp et al., 2021). Par exemple, on peut utiliser des modèles pour évaluer la réduction de la pollution de l'air grâce à la présence de végétation ou pour estimer la réduction des inondations grâce à l'absorption d'eau par les arbres et les plantes (Neuenschwander et al., 2014).

1.1.3.3 Monétisation et évaluation participative des services écosystémiques

Certaines études (Ai & Zhou, 2023; Buckley & Brough, 2017; De Groot et al., 2010; J.-J. Yang et al., 2012; Zegeye et al., 2023) utilisent des méthodes économiques pour estimer la valeur monétaire des services écosystémiques fournis par les végétaux en ville. La valeur économique des végétaux en ville peut être estimée en termes de réduction des coûts de climatisation et de chauffage des bâtiments, de diminution des coûts de traitement des eaux pluviales, diminution de la facture de la santé publique par l'amélioration du bien-être des habitants etc. Ces approches permettent de quantifier les avantages financiers que les végétaux procurent à la société.

Les évaluations participatives impliquent souvent l'engagement des résidents locaux, des communautés et d'autres parties prenantes pour évaluer les services écosystémiques rendus par les végétaux en ville. Cela peut inclure des enquêtes, des groupes de discussion, des cartographies participatives et d'autres méthodes pour recueillir des informations sur les avantages perçus par les habitants, tels que l'amélioration du bien-être, la beauté esthétique, le lien social, etc. (Koutsovili et al., 2023; Mitchell, 2005).

Il est important de noter que chaque méthode a ses avantages et ses limites. Une combinaison de ces approches peut fournir une meilleure compréhension des services écosystémiques fournis par les végétaux en ville. De plus, il est souvent nécessaire de tenir compte du contexte spécifique de chaque ville et de ses objectifs de planification urbaine pour évaluer pleinement les services écosystémiques rendus par les végétaux.

1.1.4 Gérer pour maximiser les services rendus

Pour maximiser les services rendus par les végétaux en milieu urbain, il est essentiel de mettre en place une gestion adéquate, autrement dit écologique et durable. L'intégration de la planification verte, dès le stade de conception des zones urbaines en prévoyant des espaces verts, des parcs, des couloirs écologiques et des zones de plantation d'arbres, permet de maximiser la présence de végétation dans la ville. Plusieurs paramètres sont à prendre en compte pour la maximisation des services rendus tels le choix des espèces appropriées pour les différents environnements urbains, des stratégies de gestion de l'eau efficaces, un entretien régulier des espaces verts urbains, la collaboration entre les secteurs public, privé et communautaire pour une gestion intégrée des espaces verts et un système de suivi et d'évaluation pour évaluer l'efficacité des stratégies de gestion mises en place et apporter des ajustements si nécessaire. En adoptant une approche holistique de gestion, il est possible de

maximiser les avantages des végétaux en milieu urbain et de créer des environnements urbains plus durables, écologiques, sains et agréables.

1.2 Typologie des structures végétaux en ville

Le végétal en ville a fait l'objet de plusieurs théories urbanistiques depuis le début du XIXe siècle d'où l'évolution de sa place en milieu urbain (Mehdi et al., 2012). Contrairement aux théories hygiénistes qui perçoivent les végétaux en ville comme un décor urbain, ils sont actuellement imprégnés de valeurs écologiques. Ils occupent désormais une place capitale et servent de moyen intéressant pour repenser la nature en ville (Arnould et al., 2011), améliorer le bien être humain (O'Brien et al., 2022) et réduire les aléas environnementaux (de Coninck et al., 2018).

Dans la perspective de son potentiel écologique, les végétaux en ville peuvent être désignés comme l'ensemble des espaces végétalisés privés ou publics dans un environnement urbain, regroupant une variété de formations végétales allant de quelques plantes isolées à des formations beaucoup plus importantes (Selmi, 2014) par exemple les boisements, les haies, les friches, les prairies, etc.

Dans la littérature scientifique, la végétation en ville jadis appelé « espace vert » est maintenant désignée dans la plupart des œuvres par des termes comme « structure verte » ; « infrastructure verte » ; « bande verte » qui font plus d'échos aux près des décideurs en ville (Kičić et al., 2022). En effet, la végétation en ville regroupe l'ensemble des espèces végétales se trouvant dans un milieu urbain, qu'elles soient implantées avec ou sans l'intervention de l'Homme. Elles peuvent être isolées, structurées à l'image des arbres d'alignement, des massifs fleuris ou regroupées par exemple des prairies, des boisements, des ripisylves etc.

Pour mieux appréhender la végétation en ville, les botanistes l'ont classifiée à différentes strates. Ainsi, selon Julien et Julien (2011), cette végétation peut être subdivisée en cinq strates (Figure 1. 2).

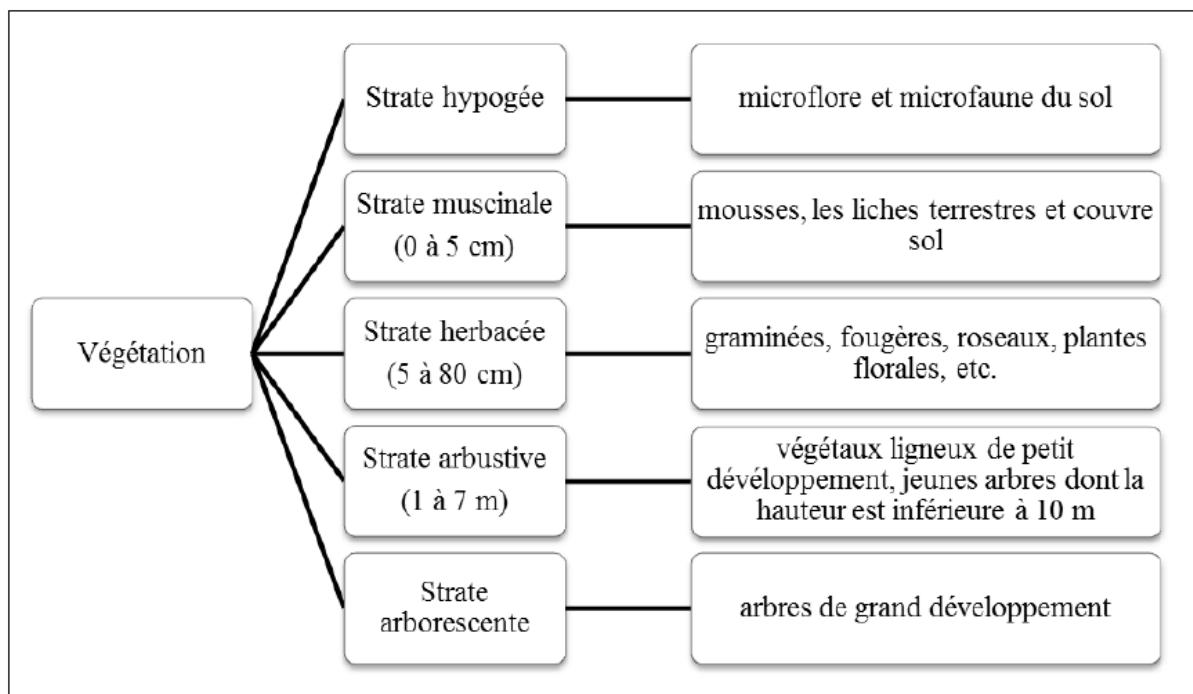


Figure 1. 2 : Strates de la végétation en espace urbain (Jullien & Jullien, 2011)

1.3 Différence culturelle du regard du végétal en ville : France et Sénégal

En France, l'appréciation du végétal en ville est historiquement liée à des préoccupations esthétiques et à une sensibilité paysagère. Les espaces verts et les parcs urbains sont considérés comme des éléments essentiels du cadre de vie, offrant un environnement agréable et propice à la détente. Les Français attachent une grande importance à l'aménagement paysager, à la conception des jardins et à la préservation des espaces verts historiques (Duris, 2007; Mathis & Pépy, 2017). Le végétal est perçu comme un moyen d'embellir les quartiers et de créer une ambiance harmonieuse. Les arbres majestueux, les massifs de fleurs colorées et les aménagements paysagers soignés sont très appréciés.

Au Sénégal, le regard sur le végétal en ville est souvent teinté d'une approche plus pragmatique et utilitaire. Les végétaux en ville sont valorisés pour leur rôle fonctionnel dans un environnement urbain souvent chaud et aride. Ils fournissent de l'ombre, contribuent à abaisser la température ambiante et protègent les habitants des rayons du soleil (Cobbinah & Darkwah, 2016). Les arbres urbains parfois fruitiers sont également appréciés pour leur production alimentaire et leurs vertus médicinales (Cilliers et al., 2013). Dans de nombreux quartiers, les arbres sont considérés comme des lieux de rassemblement où les gens se retrouvent pour discuter, échanger et partager des moments conviviaux. Par ailleurs, la préservation de la biodiversité et la lutte contre l'érosion des sols sont des préoccupations importantes en matière de végétation urbaine au Sénégal.

En revanche, la place du végétal dans la planification urbaine doit être reconSIDérée car il est important d'intégrer le végétal depuis la conception des infrastructures urbaines en prenant en compte les ressources écologiques et les risques climatiques (Cissé, 2022). Les politiques de plantations d'arbres en ville et leurs consécrations contribuent considérablement à l'atténuation thermique, à la rétention des eaux pluviales (lutte contre les inondations) et à l'amélioration de la qualité de l'air. De plus, les arbres peuvent être plantés le long des routes et des trottoirs pour fournir de l'ombre, réduire l'effet d'îlot de chaleur et améliorer l'esthétique urbaine. La planification urbaine doit également tenir compte des besoins en eau des végétaux en ville. L'utilisation de techniques d'irrigation efficaces et durables peut contribuer à préserver les ressources en eau et à assurer une utilisation rationnelle de l'eau pour l'irrigation des espaces verts.

Il existe plusieurs programmes et plans visant à mettre en place des villes vertes, durables et résilientes visant à lutter contre les changements climatiques (lutte contre l'érosion des sols, avancée du désert etc.). En l'occurrence, le programme de la grande muraille verte de Dakar à Djibouti qui traverse plusieurs pays et par conséquent plusieurs villes africaines (Delay et al., 2022; Dia & Duponnois, 2012). L'installation des petites forêts urbaines dans les villes au Sénégal en particulier Dakar et la préservation des forêts comme le parc de Hann constituent des évolutions majeures dans la transition écologique.

Enfin, la sensibilisation et la participation des communautés locales sont essentielles pour promouvoir la place du végétal en ville. Les citoyens peuvent être impliqués dans la conception et l'entretien des espaces verts, ce qui favorise un sentiment d'appartenance et de responsabilité envers leur environnement urbain.

Les différences culturelles entre le Sénégal et la France reflètent des histoires, des contextes climatiques et des modes de vie distincts. En France, l'importance accordée à l'esthétique et à l'aménagement paysager découle en partie de la tradition de l'art des jardins, de l'influence des mouvements artistiques et de l'héritage des châteaux et jardins historiques. Au Sénégal, les valeurs de communauté, de partage et d'utilisation durable des ressources naturelles imprègnent la relation avec le végétal en ville.

Comprendre ces différences culturelles est essentiel pour une planification urbaine efficace et adaptée à chaque contexte. Il est important d'impliquer les communautés locales, de prendre en compte leurs besoins et leurs attentes spécifiques, et d'adopter une approche participative dans la gestion des espaces verts en milieu urbain. Une meilleure compréhension de la vision

polysémique du végétal en ville permet de favoriser une cohabitation harmonieuse entre l'environnement bâti et naturel, en tenant compte des spécificités culturelles et des valeurs attachées au végétal dans chaque société.

En conclusion, la France et le Sénégal ont des approches différentes mais complémentaires dans la valorisation du végétal en ville. Alors que la France met l'accent sur l'esthétisme et la création d'environnements paysagers attrayants, le Sénégal accorde une plus grande importance à la fonctionnalité et à l'utilité des arbres urbains. En combinant ces approches et en tenant compte des particularités culturelles de chaque pays, il est possible de créer des espaces verts urbains qui répondent aux besoins esthétiques, fonctionnels, écologiques et sociaux des communautés, tout en favorisant une connexion profonde avec la nature et une qualité de vie améliorée.

2 Milieu de développement du végétal

2.1 Sol en milieu urbain

Le sol est un compartiment complexe, un carrefour multifonctionnel, en relation avec lithosphère, hydrosphère, atmosphère et biosphère (Gobat et al., 2010). Il est le résultat de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie et des échanges d'énergie qui s'y manifestent (Lozet & Mathieu, 1997). C'est une entité vivante et dynamique, qui est nécessaire au fonctionnement des écosystèmes terrestres.

Outre l'intérêt évident des sols dans le fonctionnement des écosystèmes, les sols fournissent pléthore de services bénéfiques à l'homme et à l'environnement : support des individus et des constructions, production de nourriture et bois, ressources en matériaux divers, épuration et stockage de déchets, production d'énergie, protection contre les radiations, puits de carbone, point de passage obligé pour les apports d'eau des végétaux…

Concernant le sol urbain, il est essentiellement un nouveau sol artificiel, qui a été affecté par les activités humaines, et sa formation et sa nature ne sont pas nécessairement liées à l'environnement naturel. Il présente des propriétés bio-physico-chimiques particulières. En effet, le sol urbain est compact du fait des activités anthropiques réduisant ainsi sa porosité et son aération. L'urbanisation florissante engendre des conséquences sur les caractéristiques chimiques des sols urbains par la présence importante du béton et de forte teneur en carbonates d'où le pH élevé du sol urbain (Lan et al., 2019). Le sol urbain est aussi caractérisé par une présence hétérogène d'éléments nutritifs tels que le carbone organique ou l'azote et le

phosphore (Joimel et al., 2016). En plus de la présence limitée de propriétés chimiques, le sol urbain s'expose à de multiples contaminations par la présence de métaux lourd issues de diverses pollutions diffuses ou ponctuelles (Schwartz et al., 2015).

Les sols urbains sont des dérivés des sols naturels, ce qui entraîne encore une plus grande variabilité de contextes pédologiques par rapport aux milieux non anthropisés. La variabilité d'usage (support d'usages résidentiel, industriel, commercial, support d'installation sportive et de loisirs ou encore de production de biomasse) encourage une forte hétérogénéité à la fois verticale et horizontale des propriétés physico-chimiques des sols urbains (Cornu et al., 2021; Craul, 1992; Lehmann & Stahr, 2007).

Contrairement aux sols forestiers et agricoles, les sols urbains restent moins étudiés par les pédologues qui éprouvent beaucoup de difficultés pour caractériser, échantillonner et cartographier les sols sur une échelle large pouvant couvrir un territoire. En France, les différents types de sols présents sur le territoire sont cartographiés en s'appuyant sur la notion de continuité pédologique basée sur l'analyse des facteurs naturels de formations des sols. Cependant, les zones urbaines représentées en tâches blanches sur la carte (Figure 1. 3) ne sont pas cartographiées du fait de leurs hétérogénéités.

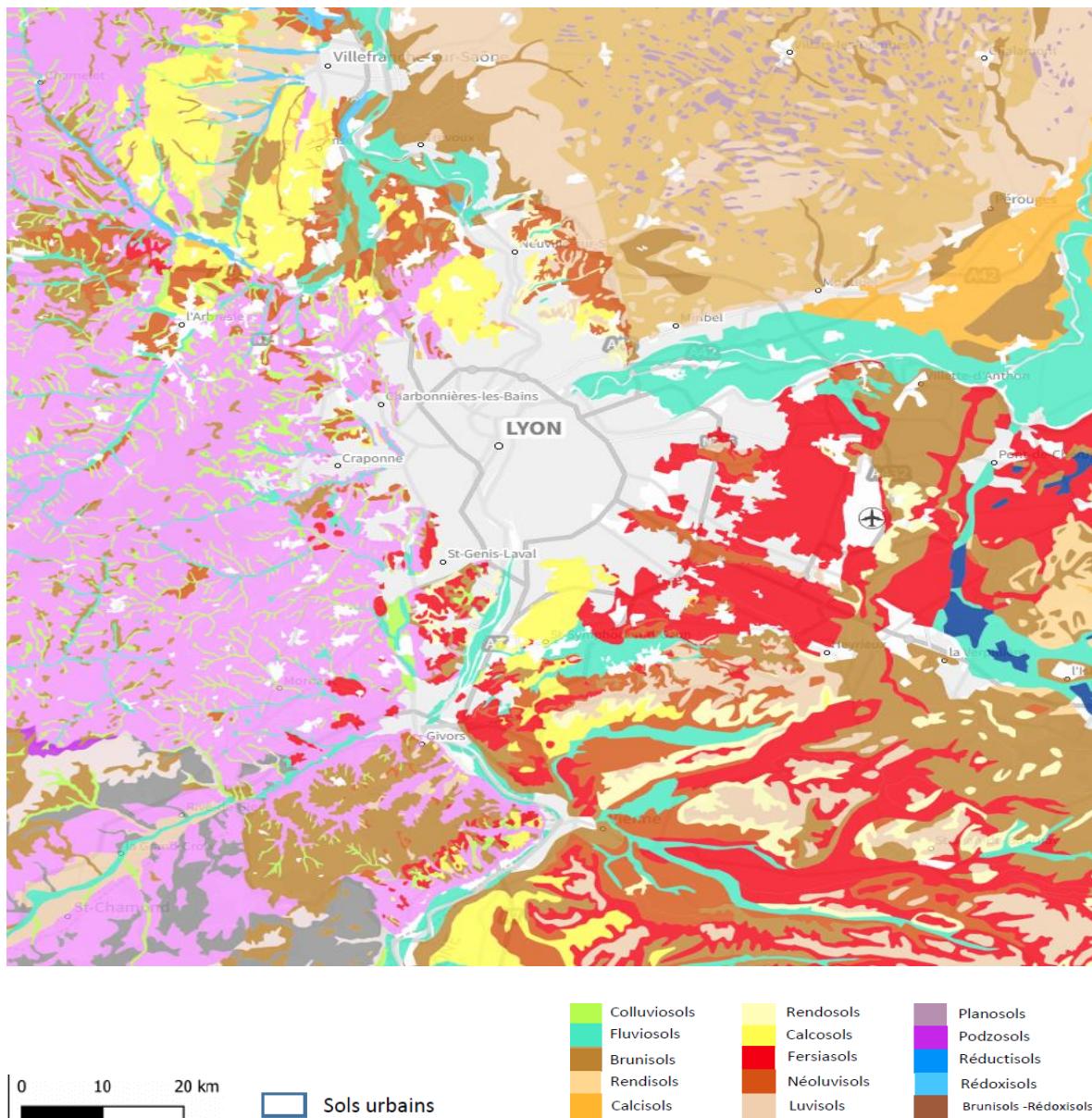


Figure 1. 3 : Les différents types de sols présents autour de la ville de Lyon et sa zone blanche définissant les sols urbains. (Groupement d’Intérêt Scientifique sur les Sols (GIS Sol) – Réseau Mixte Technologique Sols et Territoires, 2019).

2.2 Climat urbain

Les caractéristiques de l’atmosphère sont modifiées en zones urbaines d’un point de vue radiatif, thermique, hydrique et aérodynamique (Dupont, 2001). En effet, la ville se distingue des autres écosystèmes par la présence des éléments techniques (bâtiments, infrastructures, etc.) qui modifient intensément les aspects météorologiques et climatologiques (Figure 1. 4). Contrairement au climat rural, le climat urbain se distingue par une vitesse de vent réduite due à la rugosité des surfaces construites qui augmente le frottement et freine l’écoulement de l’air, une évapotranspiration réduite dû aux carences en termes de surface végétalisée et une

production de chaleur importante transmise dans l'atmosphère à cause des activités anthropiques.

Le climat urbain est particulier car il a engendré le phénomène de l'îlot de chaleur en ville. Il est issu de la chaleur emmagasinée puis dégagée par les bâtiments, il s'agit d'un flux de chaleur dépendant des caractéristiques physiques des bâtiments. C'est à dire que la température de l'air d'une ville est plus élevée que la température qu'aurait cet air sans les constructions urbaines. L'îlot de chaleur est mesuré à partir de l'écart de température entre l'air de la ville et l'air de la région rurale qui l'entoure.

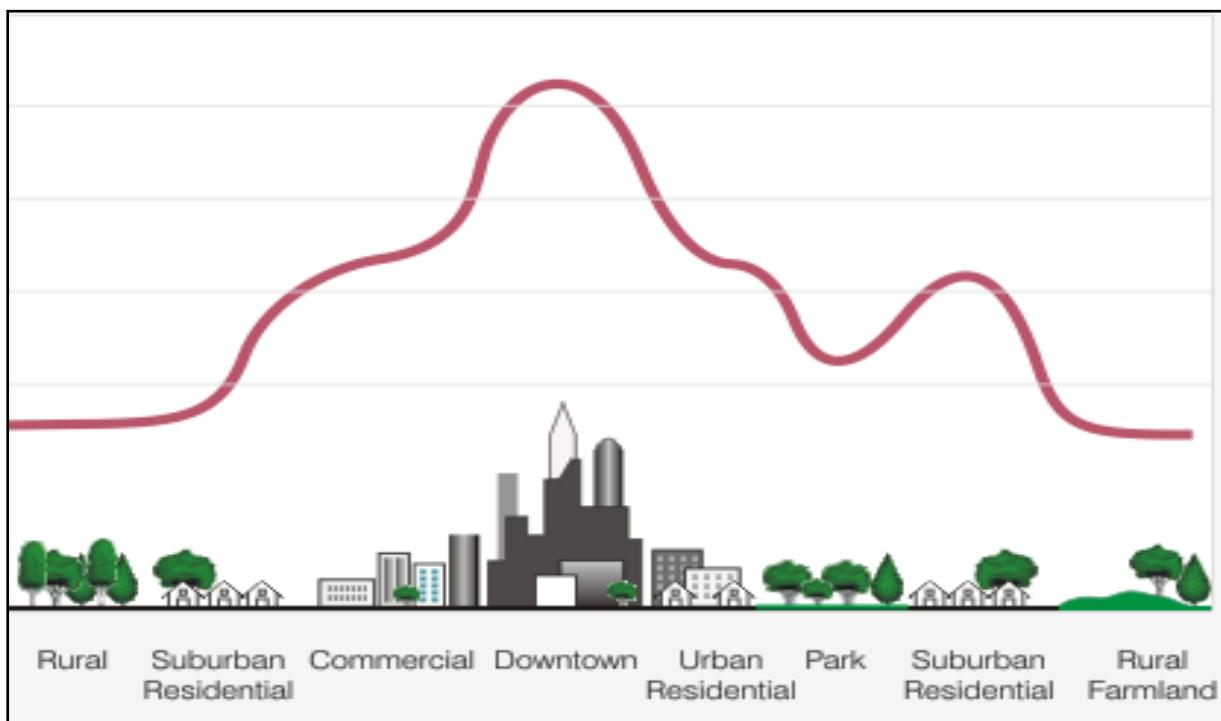


Figure 1. 4 : Îlot de chaleur urbain : la température de l'air en ville et milieu rural¹

2.3 Interaction Sol-Végétation-Atmosphère

A partir de ses compartiments (tige, racines, feuilles) qui sont en perpétuelles interactions échangeant des flux de matière et d'énergie, le végétal interagit avec d'autres éléments abiotiques de son environnement à savoir le sol, l'atmosphère etc. Cette interaction s'effectue par le biais des fonctions métaboliques des plantes telles que la photosynthèse, la respiration la transpiration et l'absorption d'eau et nutriments (Silva & Lambers, 2018; WANIA, 2007). Tous les échanges se font grâce aux parties souterraines du végétal à travers le système racinaire

¹ <http://www.new-learn.info/packages/euleb/fr/glossary/index.html> (23/05/2023)

(Drénou et al., 2006) et aux parties aériennes avec les stomates (orifice au niveau des feuilles) (Denys, 2002).

Le sol, point de passage obligé de l'eau pour alimenter le végétal en nutriments, a une aptitude de stockage d'eau ce que lui confère aussi les fonctions de réservoir, d'infiltration, de diffusion d'eau. Ces fonctions sont variables selon les caractéristiques physiques du sol (la texture et la structure) (Tron, ISBERIE, et al., 2013). Les racines sont des organes spécialisés dans l'absorption de l'eau et les éléments minéraux présents dans la solution du sol et qui sont essentiels pour la croissance et le développement du végétal. L'atmosphère agit sur le végétal à travers les feuilles qui servent d'interface et assurent la régulation du courant de transpiration au travers du végétal (Denys, 2002).

Ainsi, le sol et l'atmosphère agissent sur la végétation en déterminant la dominance de l'espèce, jouant sur la croissance et définissant l'état sanitaire des végétaux. L'ensemble des interactions au sein du végétal et entre les éléments abiotiques (sol-atmosphère) permettent de maintenir la survie, la croissance de la végétation et les services procurés. Pléthore d'études existent sur la relation entre le végétal, le sol et l'atmosphère dans le milieu naturel, cependant, peu s'intéressent au milieu urbain par le fait du contexte très fortement modifié par les activités anthropiques. En milieu urbain, le fonctionnement normal du végétal et ses interactions avec les éléments abiotiques sont fortement perturbés par les phénomènes de l'urbanisation et ses conséquences (Tron, ISBERIE, et al., 2013). En effet, les végétaux en espaces verts vivent dans un environnement fortement différent à leur écosystème naturel.

Le végétal se développe dans un volume de sol souvent compacté, imperméable et délimité à cause de la présence d'autres infrastructures du milieu urbain (Figure 1. 5). Cela occasionne plusieurs altérations sur le fonctionnement normal du végétal (Bennie et al., 2016; Bourgery & Mailliet, 1993; Ffrench-Constant et al., 2016). Le climat urbain très spécifique différent du climat rural ou forestier et impacte aussi le fonctionnement normal du végétal particulièrement sur la transpiration. En plus de l'importance de la réserve en eau disponible du sol, les paramètres climatiques (température, humidité de l'air, vent, rayonnement solaire etc.) interviennent sur la capacité du végétal à transpirer, faire de la photosynthèse et se développer (Roman & Scatena, 2011).

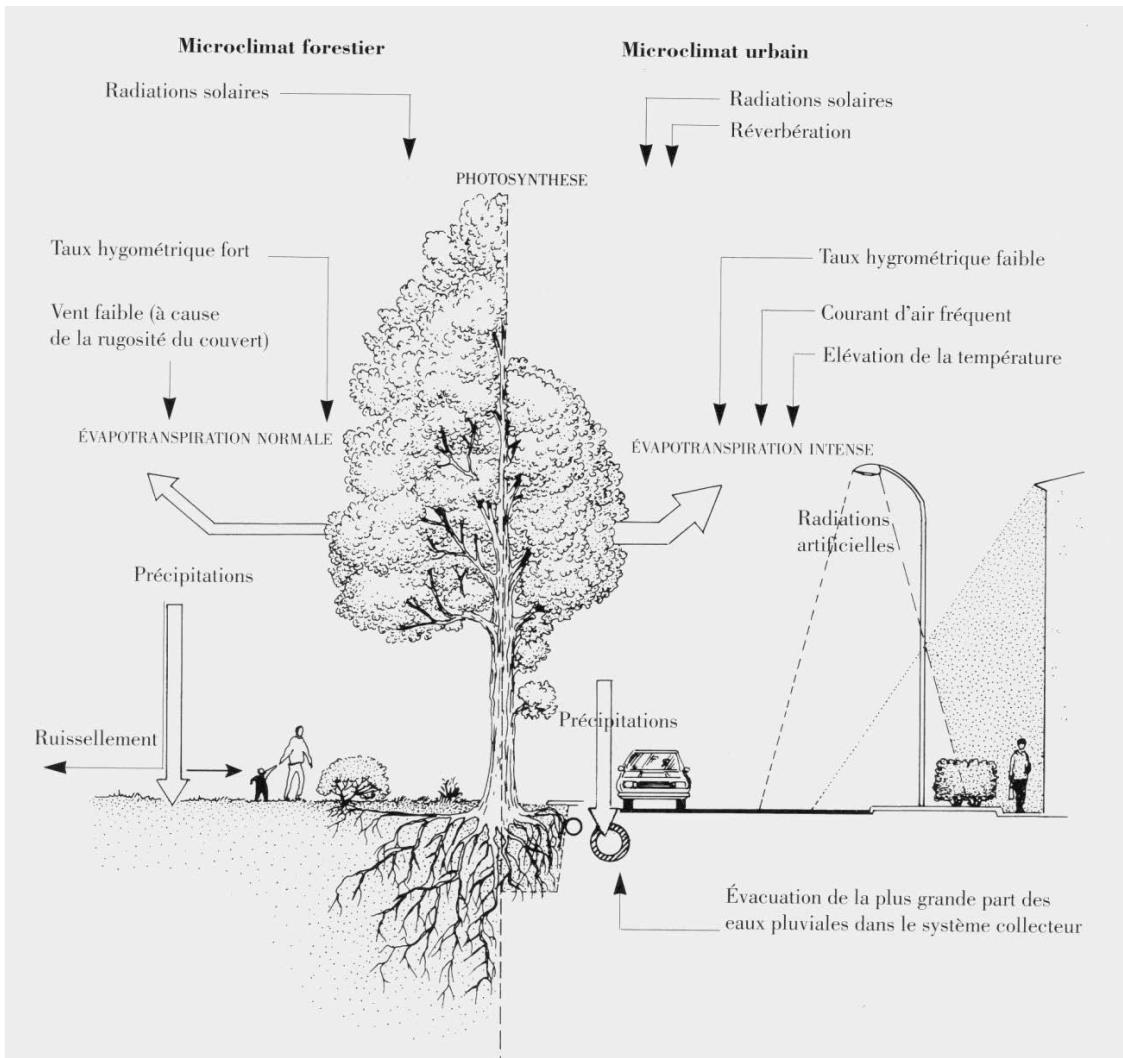


Figure 1. 5: Dessin représentant les conditions microclimatiques d'un arbre planté en rue en comparaison avec un arbre en milieu forestier (Bourgery & Mailliet, 1993).

3 Installation des jeunes arbres en ville

3.1 Les acteurs de l'installation des arbres en ville

Les arbres en ville se situent à la croisée des préoccupations et de l'expertise de nombreux acteurs. Du candidat aux municipales qui propose des plans de végétalisation urbaine et se livre à une surenchère sur des millions d'arbres à planter à l'ouvrier qui arrose l'arbre et l'accompagne jusqu'à son implantation dans son nouvel environnement, l'installation d'arbre en ville requiert toute une chaîne de compétences, des élus, des entreprises, des emplois locaux, des pépiniéristes, fabricants de sol, planteurs, équipe de surveillance et d'entretien des arbres, élagueurs etc.

Voici les principaux acteurs et leurs relations autour d'un projet de plantation d'arbres :

Maître d'ouvrage : Il est le principal décideur du projet et à l'origine de la commande. Il peut orienter le projet sur des choix particuliers et joue le rôle d'arbitrage pour trancher. Dans le cadre d'une opération d'aménagement, le maître d'ouvrage est le plus souvent représenté par des métropoles, collectivités, aménageurs ou promoteurs (privés).

Maîtrise d'œuvre : Il apporte l'appui technique nécessaire aux décisions du maître d'ouvrage. En termes de plantation, la maîtrise d'œuvre réalise la conception générale du projet, propose les espèces d'arbres à utiliser en fonction des attentes du projet.

Entreprises ou Régie de collectivité : Elles sont chargées de la réalisation et se doivent donc d'appliquer les règles de l'art liées aux plantations (mise en œuvre). Il faut s'assurer du respect des prescriptions décrites au CCTP, et auparavant des compétences de l'entreprise lors de la consultation des entreprises (DCE).

Bureau d'études, Entreprise sous-traitance : Ils peuvent être appelés par l'entreprise en charge du projet ou l'assistant du maître d'ouvrage (régie). Ils sont chargés de la réalisation d'une partie spécifique du projet. Exemple : l'entreprise chargée de la plantation ou l'assistant du MOA peut engager une autre entreprise pour le suivi des arrosages de la plantation avec des capteurs afin de garantir la reprise complète.

Gestionnaire (Régie) : Le maître d'ouvrage peut déléguer la gestion à son assistant (métropole, commune) ou à une entreprise spécialisée. Ils sont chargés de l'entretien de son patrimoine arboré et élaborent ainsi un plan de gestion.

3.2 Fiabilisation des plantations par le contrôle de la reprise des arbres

Dans un contexte de recrudescence des plantations, pour répondre aux conséquences du changement climatique, faisant face à des risques notables d'échecs de reprise des arbres, un suivi continu lors des deux voire trois premières années après transplantation peut être réalisé pour fiabiliser les plantations. Dans cette perspective, des structures spécialisées se positionnent pour accompagner les collectivités à rentabiliser les plantations et minimiser considérablement les échecs de reprises des arbres.

En effet, les arbres nouvellement transplantés en milieu urbain proviennent des pépinières et perdent une partie importante de leur système racinaire (Drénou et al., 2006) et le reste se limite uniquement dans la motte. En dépit de l'existence de multi facteurs pouvant conduire à un échec de plantation d'arbres en l'occurrence : problème de choix d'espèces lors de la conception du projet, mauvais itinéraire technique lors de la production des arbres au niveau

de la pépinière, mauvais traitement du sol lors de la plantation etc. Cependant, une mauvaise conduite d’irrigation des jeunes arbres pendant la période critique des 2-3 ans après la plantation constitue un danger majeur pouvant conduire à un échec de reprise et par conséquent la mort prématurée des arbres (Bréda et al., 2006; Granier et al., 2007; Konijnendijk et al., 2005; Puhlmann et al., 2019).

Selon l’espèce et le site d’implantation parfois constraint (Figure 1. 6), les apports nécessitent un bon suivi pour assurer la viabilité des arbres et économiser la ressource en eau. En plus, les systèmes d’arrosages sont rarement intégrés, ce qui rend encore les interventions fastidieuses (compte tenu des moyens logistiques et humains à mettre en place). La maîtrise de l’irrigation est alors essentielle durant cette phase pour assurer la reprise de l’arbre et sa résilience à moyen terme, tout en rationalisant les moyens humains et financiers déployés. Pour une bonne maîtrise des apports ainsi qu’une bonne gestion de la ressource en eau, un suivi de la disponibilité en eau du sol tout au long de l’année est primordial. Il devient alors important d’accompagner les décideurs pendant cette période critique pour rentabiliser et fiabiliser les plantations (Rambhia et al., 2023; Vico et al., 2014).

Le suivi des besoins en eau des arbres en ville reste une tâche complexe car la consommation en eau des arbres provient de plusieurs sources en l’occurrence les apports d’eau par arrosage, l’eau souterraine (canalisations, circulations en sub-surface) et l’eau de pluie. Dans ce cadre il est important de surveiller l’état hydrique du sol pour piloter les apports en eau en s’informant instantanément sur la disponibilité d’eau dans le sol et sur les données climatiques. Pour ce faire le déploiement des outils nécessaires (capteurs) et des modèles de suivi des apports en eau des arbres restent indispensables. Ces 10 dernières années, des structures privées se sont engagées dans cette perspective en proposant des services aux collectivités leurs permettant d’assurer une reprise des arbres nouvellement transplantés et optimiser les ressources déployées (exemple Urbasense).

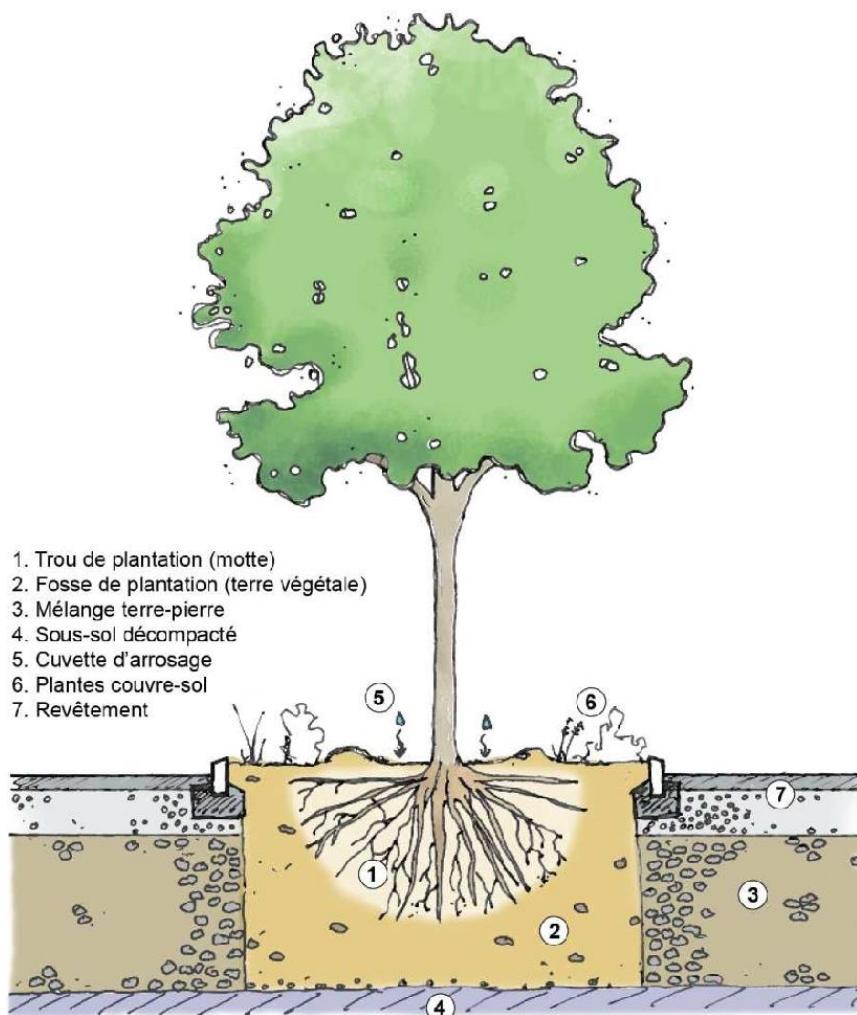


Figure 1. 6 : Présentation générale de l'environnement de plantation d'un arbre en ville
(Source : (Gourrierec, 2012))

3.3 Techniques de détection de reprises des arbres

La reprise de l'arbre est un processus biologique au cours duquel l'arbre transplanté s'ancre définitivement dans son nouvel environnement (ATGER & GENOYER, 2017; Grossnickle, 2005; Rietveld, 1989) et à partir duquel il pourra remplir les services écosystémiques attendus. En effet, les arbres nouvellement transplantés souffrent d'un « stress post-transplantation » caractérisé par une modification des fonctions physiologiques et une diminution de la croissance (Struve, 2009; G. Watson & Hewitt, 2020). Les racines qui naissent naturellement à partir de semis de graines (semés sur place) se développent en fonction des conditions du sol et d'autres paramètres (climat, espèces etc.), alors que les racines des arbres transplantés sont forcées de s'acclimater à leur nouvel environnement. Dans la plupart des cas de transplantations d'arbres en milieu urbain, il s'agit des arbres en provenance de la pépinière qui perdent plus de 70% de son système racinaire (Drénou et al., 2006) favorisant le « stress post-transplantation ».

Il existe pléthore d'études portant sur les différents aspects de la reprise des arbres plantés mais la plupart de ces études ne prennent pas en compte les arbres poussant dans des zones urbaines typiquement contraignantes mais plutôt dans des pépinières ou dans des conditions de culture bien déterminées (Gilman et al., 2013; Puyal et al., 2022; Struve, 2009; G. Watson & Hewitt, 2020; G. W. Watson et al., 1986). Quelques études se sont intéressées à la croissance et à la survie des arbres plantés dans de véritables sites urbains (Schütt et al., 2022; Sherman et al., 2016) qui peuvent conclure sur l'état de la reprise des sujets étudiés. Plusieurs facteurs liés au site (contexte pédologique, niveau d'urbanisation, obstacles souterrains, largeur des rues, volume du sol de l'arbre) à la méthode de production (parcours en pépinière), à l'irrigation (Koeser et al., 2014; Rambhia et al., 2023) peuvent aussi influencer la survie et la croissance des arbres transplantés et par conséquent la reprise.

De nombreuses initiatives ont été menées ces dernières années pour améliorer le succès des plantations d'arbres en accompagnant les gestionnaires sur les enjeux de la forêt urbaine, en leur permettant d'accéder à des connaissances et des informations sur les soins post-plantations et encourager la conservation des arbres existants (Sousa-Silva et al., 2023). En effet, une enquête dans les différentes villes des pays européens a montré un manque de connaissances sur la reprise et la survie des arbres dans les zones urbaines (Pauleit et al., 2002). Cependant, des études récentes ont pris en compte divers aspects de la survie et de la reprise des arbres après transplantation (Koeser et al., 2014; Sherman et al., 2016; Schütt et al., 2022; Roman & Scatena, 2011).

D'après Atger et al (2017), la reprise peut être constatée par plusieurs manières, soit au niveau de la partie aérienne ou la partie souterraine. L'évolution de la dynamique de croissance de l'arbre de l'ensemble du houppier dans le temps a été le principal critère utilisé pour caractériser la performance de la reprise aérienne. En effet, plusieurs indicateurs sur la partie aérienne de l'arbre ont permis d'évaluer la reprise à titre d'exemple l'évolution de la longueur des pousses ou des tiges, le grossissement du tronc, les dimensions du feuillage etc. (Dostálek et al., 2014; Harris et al., 2008; Koeser et al., 2014; Pinto-Correia et al., 2011; Radoglou & Raftoyannis, 2002; Sherman et al., 2016; Struve & Joly, 1992; Woolery & Jacobs, 2014). Toutes fois, la technique pour caractériser la reprise de l'arbre via la partie aérienne reste une évaluation visuelle contrôlée par des mesures directes et l'application de marqueurs morphologiques.

Contrairement à la partie aérienne, la partie souterraine, composée essentiellement du système racinaire et considéré comme une mystérieuse boite noire (Drénou et al., 2006), constitue un obstacle majeur pour constater la reprise à partir d'une évaluation visuelle. Cependant, pour évaluer la reprise racinaire, il faut appliquer des méthodes partiellement destructrices en l'occurrence le diagnostic racinaire permettant de réaliser des profils de sol en creusant pour déterminer la performance d'occupation du sol par les racines à différents niveaux de profondeur et distances du tronc. Il est aussi possible de procéder à une excavation racinaire pour une analyse détaillée de l'état de l'enracinement et observer la colonisation racinaire pour une meilleure évaluation de la reprise.

3.4 Principaux systèmes d'irrigation des arbres en milieu urbain

Pour survivre, les jeunes arbres nouvellement transplantés avec leurs systèmes racinaires initialement limités dans la motte, dépendent fortement de la disponibilité de l'eau du sol. Cette phase est critique pour assurer la reprise racinaire, l'ancrage dans leur nouvel environnement et pour surtout minimiser le risque de mort prématuée (Bréda et al., 2006; Puhlmann et al., 2019). Il convient donc de veiller à ce que les jeunes plantations soient suffisamment arrosées et que cet arrosage soit effectué de manière à ce que l'eau pénètre bien dans la motte (Clark & Kjelgren, 1990; Konijnendijk et al., 2005) mais aussi que les apports soient efficaces dans ce contexte de changement climatique où la ressource est de plus en plus rare (Bond et al., 2019).

Comme pour toute production végétale, il y a deux manières d'irrigations pour apporter de l'eau aux végétaux en milieu urbain et particulièrement les plantations d'arbres. Il s'agit de l'irrigation manuelle, une méthode classique qui a toujours existé (Ronna, 1888) et l'irrigation automatique (Mohamadzade et al., 2021; Rambhia et al., 2023). L'irrigation manuelle est le système le plus courant qui consiste à apporter de l'eau directement via un tuyau connecté à une citerne mobile ou à une bouche à clé fixe dans le cas des arbres urbains². Cette méthode permet un contrôle précis de la quantité d'eau (à l'aide d'un débitmètre mécanique) et de la zone ciblée, mais nécessite une intervention régulière. Quant à l'irrigation automatique, elle consiste à fournir de l'eau sans intervention humaine directement à l'aide de tuyaux, goutteurs ou autres systèmes installés au pied de l'arbre. Il existe plusieurs approches de l'irrigation automatique : aspersion, goutte à goutte, souterraine, goutteurs etc. (*Fascicule n°35*, 2021). Les détails de ces stratégies d'irrigations sont expliqués dans le chapitre 2.

² <https://www.paris.fr/pages/l-arbre-a-paris-199>

L'évaluation des besoins en arrosage des végétaux se fait en se basant sur leur observation, les données météorologiques, l'utilisation éventuelle de cannes pédologiques pour évaluer l'humidité du sol. Ainsi, la quantité d'eau nécessaire aux végétaux est déterminée par l'opérateur en fonction de la nature des sols, des essences, de la pluviométrie, de la période de végétation et de l'âge des végétaux (*Fascicule n°35*, 2021). Dans la pratique, les arbres nouvellement plantés sont arrosés 2 fois par mois lorsque l'arrosage est manuel et plusieurs fois par semaine lorsque l'arrosage est automatisé, lors des premières années suivant la transplantation.

Il est important de prendre en compte les besoins spécifiques des arbres, les conditions climatiques locales et la disponibilité des ressources en eau lors du choix de l'approche d'irrigation la plus adaptée et éviter d'irriguer les végétaux à l'aveugle. Ainsi, la détermination précise des besoins en eau des plantes est un élément essentiel. Il est possible d'évaluer les besoins en eau des plantes en utilisant des méthodes indirectes, telles que l'utilisation de l'évapotranspiration de référence (ET) spécifique aux espèces ornementales (Costello, 1994), ou des méthodes directes qui font appel à des capteurs d'humidité du sol (P. Patil & Desai, 2013) ou à des systèmes satellitaires (Hof & Wolf, 2014; Mateos et al., 2013). Une planification appropriée et une gestion régulière de l'irrigation sont essentielles pour maintenir la santé des arbres en milieu urbain.

Conclusion

Après une analyse approfondie de la place, des rôles et des services écosystémiques offerts par les végétaux en milieu urbain il est incontestable que leur importance dépasse largement leur apparence ornementale antérieure. Ils ont évolué pour devenir des composantes intégrales des écosystèmes urbains, démontrant leur contribution significative à la fois à l'homme et à l'environnement. Les végétaux en milieu urbain jouent un rôle fondamental dans la préservation de la biodiversité, la régulation du climat local, la réduction des polluants atmosphériques, l'atténuation des îlots de chaleur et l'amélioration de la qualité de vie des habitants des zones urbaines. De plus, leur capacité à stocker le carbone, à stabiliser les sols et à servir de rempart naturel contre les catastrophes naturelles renforce leur statut en tant qu'éléments incontournables des écosystèmes urbains.

Il est devenu indéniable que les végétaux en milieu urbain représentent une réponse prometteuse et efficace pour relever les défis imposés par le changement climatique et les problèmes environnementaux dans nos villes. En encourageant l'expansion de la végétation

urbaine et en favorisant sa conservation, les villes peuvent non seulement renforcer leur résilience face aux impacts du changement climatique mais aussi améliorer le bien-être des citoyens urbains. Par conséquent, la promotion de l'intégration et la conservation des végétaux en milieu urbain devraient être une priorité pour les décideurs, les urbanistes et les chercheurs. Cependant, il est important de souligner que les végétaux ont besoin d'eau pour assurer leur croissance et développement, ainsi une gestion efficace de l'eau en milieu urbain, notamment en ce qui concerne l'irrigation des végétaux, revêt d'une importance capitale.

Chapitre 2 : Irrigation en milieu urbain

1 Irrigation des végétaux

1.1 Evolution des économies d'eau par les systèmes d'irrigation et les modes de déclenchement (stratégies d'irrigation)

Le terme "système d'irrigation" désigne l'ensemble des composants, équipements et infrastructures utilisés pour fournir de l'eau aux plantes. Il s'agit d'un système physique qui comprend des éléments tels que les canaux d'irrigation, les pompes, les tuyaux, les arroseurs, les goutteurs, etc (Bjorneberg & Sojka, 2005; Timsina & Weerahewa, 2023). Concernant la "stratégie d'irrigation", elle se réfère à l'approche ou à la planification adoptée pour utiliser et gérer l'eau dans le système d'irrigation. Il s'agit de la manière dont l'eau est allouée, contrôlée et appliquée aux végétaux pour répondre à leurs besoins en eau (Srinivasan et al., 2021). Les stratégies d'irrigation permettent aussi de déterminer quand et combien le végétal doit être irrigué, ainsi que les techniques utilisées pour le faire. Pléthore d'études ont été menées ces dernières années pour une meilleure stratégie d'irrigation afin de mieux gérer l'eau qui est davantage préoccupante (J. C. Mailhol et al., 2004; Irmak et al., 2006; Serraj et al., 2009; Bouazzama et al., 2013; Z. Li, 2013; Tron, ISBERIE, et al., 2013; Mohamadzade et al., 2021; Gimpel et al., 2021; Kang et al., 2023).

En effet, les systèmes d'irrigation ont joué un rôle crucial dans le développement du végétal et de la civilisation humaine. Au fil des siècles, différents systèmes ont été développés pour fournir de l'eau aux plantes, passant des méthodes manuelles rudimentaires (Ronna, 1888) à des systèmes modernes automatisés (Vera et al., 2021). Ainsi, l'évolution des systèmes d'irrigation et des stratégies d'irrigation sont étroitement liées et se sont influencées mutuellement au fil du temps car chaque système d'irrigation nécessite une stratégie pour apporter l'eau. Donc l'amélioration des systèmes d'irrigation a permis le développement de nouvelles stratégies d'irrigation adaptées à ces systèmes. Par exemple, l'introduction de l'irrigation par aspersion a nécessité la mise en place de stratégies spécifiques pour régler les arroseurs et optimiser l'utilisation de l'eau (Bjorneberg & Sojka, 2005). De même, l'adoption de l'irrigation localisée a conduit à la mise en place de stratégies de gestion précise de l'eau au niveau des goutteurs (Hochmuth, 2017). Pour mieux comprendre cette évolution, un résumé des différents systèmes et stratégies est proposé dans les lignes suivantes.

D'abord, l'irrigation manuelle, qui était la méthode prédominante dans les premiers temps, où des arrosoirs, des seaux ou des canalisations rudimentaires ont été utilisés pour transporter l'eau des sources vers les champs (Ronna, 1888). Cette méthode traditionnelle était basée sur l'idée

d'apporter aux plantes d'eau abondante pour répondre à tous leurs besoins en eau. Il s'agit de la stratégie d'irrigation par inondation où l'eau était pulvérisée sur les plantes. Cette approche avait tendance à entraîner une utilisation excessive de l'eau, des pertes importantes par évaporation et ruissellement, ainsi qu'une utilisation inefficace des ressources en eau.

Ensuite, l'irrigation par gravité a été développée (Ramalan & Hill, 2000). Elle reposait sur la création de canaux pour transporter l'eau des sources vers les champs en utilisant la force de gravité (Bjorneberg & Sojka, 2005). Avec cette approche, des systèmes de fossés, de rigoles et de bassins de stockage ont été utilisés pour réguler le flux d'eau et le distribuer de manière plus efficace.

L'introduction de l'irrigation par aspersion a été une avancée majeure. Au lieu de fournir l'eau directement au sol, cette méthode pulvériseait l'eau sous forme de gouttelettes à l'aide d'arroseurs rotatifs ou de canons d'arrosage (Bjorneberg & Sojka, 2005). L'irrigation localisée autrement dit irrigation goutte à goutte est une méthode plus récente (Hedley et al., 2014). Elle consiste à appliquer l'eau directement à la racine des plantes avec l'utilisation des tuyaux comprenant des goutteurs pour distribuer l'eau de manière contrôlée (Hochmuth, 2017). Cette méthode réduit les pertes d'eau dues à l'évaporation et au ruissellement, et favorise une meilleure absorption de l'eau par les racines car les goutteurs étant proche de celles-ci, améliorant ainsi l'efficacité de l'irrigation et la croissance des plantes (L. Guo et al., 2022).

L'évolution des systèmes et des stratégies d'irrigation ne cesse d'accroître, l'avènement des technologies modernes a permis aujourd'hui le développement de systèmes d'irrigation automatisés (Pramanik et al., 2022). Ces nouvelles technologies et les systèmes d'irrigation modernes ont permis de développer des stratégies nouvelles visant à optimiser davantage l'utilisation de l'eau. L'irrigation basée sur la demande en eau du sol a émergé avec l'avènement des capteurs d'humidité du sol, permettant une irrigation plus précise en fonction des besoins réels des plantes. Les systèmes d'irrigation automatisés (Vera et al., 2021; Guntur et al., 2022) ont également facilité la mise en place de stratégies d'irrigation programmées en fonction de l'heure, de la durée et de la fréquence d'arrosage.

Aujourd'hui, pour améliorer davantage l'efficacité de l'irrigation, économiser encore l'eau et maximiser de plus en plus les rendements des végétaux, l'innovation se poursuit avec des approches telles que l'irrigation intelligente basée sur l'intelligence artificielle et l'utilisation de capteurs avancés pour une gestion précise de l'eau (Navinkumar et al., 2021; Gao et al., 2023). Mais aussi une autre stratégie est appliquée il y a quelques décennies surtout dans les pays

ardes et semi arides, l'irrigation déficitaire (Chalmers et al., 1981; Marsal et al., 2000; Kang et al., 2023). Elle repose sur une gestion précise de l'eau, en fournissant uniquement la quantité nécessaire à des périodes précises du processus de développement du végétal pour maintenir la croissance tout en minimisant au maximum le gaspillage.

Les stratégies d'irrigation ont dû s'adapter aux changements environnementaux et climatiques. Les périodes de sécheresse ont nécessité le développement de stratégies d'irrigation résilientes, telles que l'irrigation par réutilisation des eaux usées ou l'utilisation de techniques de conservation de l'eau et de récupération des eaux de pluies. Les systèmes d'irrigation ont également intégré des fonctionnalités de contrôle climatique, permettant d'ajuster automatiquement les paramètres d'irrigation en fonction des prévisions météorologiques.

En résumé, l'évolution des systèmes d'irrigation a ouvert la voie à de nouvelles stratégies d'irrigation, visant à optimiser l'utilisation de l'eau, réduire le gaspillage et s'adapter aux conditions environnementales changeantes. Les deux aspects se complètent mutuellement dans la quête d'une irrigation plus efficace et durable.

1.2 Irrigation des végétaux en ville

Comme dans l'agriculture, l'utilisation de l'eau est essentielle pour les végétaux en ville pour garantir leur survie et favoriser leur croissance afin d'assurer les effets positifs qu'ils procurent aux espaces végétalisés qui remplissent des fonctions bénéfiques à l'environnement et à la santé humaine (Nowak, 2018; Escobedo et al., 2019). L'approvisionnement adéquat en eau joue un rôle crucial dans le maintien en vie des végétaux dans un environnement urbain souvent caractérisé par des conditions stressantes telles que la chaleur, le manque d'espace, le sol compacté et la concurrence pour les ressources (Lehmann & Stahr, 2007; Cornu et al., 2021).

Au fil du temps, l'irrigation des végétaux en ville a évolué pour répondre aux défis spécifiques de cet environnement. En milieu urbain, les systèmes d'irrigation utilisés sont adaptés en fonction des types de strates végétales pour répondre aux besoins spécifiques des végétaux (McCarthy et al., 2011; Litvak & Pataki, 2016). A l'image de la production agricole, il existe deux approches pour apporter de l'eau aux végétaux en ville pour une meilleure gestion à savoir l'irrigation manuelle et l'irrigation automatique.

1.2.1 Irrigation manuelle

L'irrigation manuelle des végétaux en ville est une méthode d'irrigation qui implique l'application directe de l'eau par des moyens manuels tels que des arrosoirs, des tuyaux d'arrosage ou des pulvérisateurs (Ronna, 1888). Elle permet de contrôler précisément la

quantité d'eau fournie aux plantes (Figure 2. 2) et de s'adapter aux besoins spécifiques de chaque espèce végétale. Cette approche nécessite l'intervention humaine pour assurer une irrigation adéquate et favoriser la croissance saine des plantes en milieu urbain.

Cette méthode « rudimentaire » reste encore pratiquée surtout pour les arbres urbains nouvellement plantés qui nécessitent au cours de leur cycle de reprise et de croissance (voir chapitre 1) de l'eau, à portée de leurs racines au bon moment et pendant 2 à 3 ans suivant leur plantation (Puhlmann et al., 2019). Ces apports au niveau de la cuvette formant la motte permettent à l'arbre de s'établir dans son nouvel environnement et développer un système racinaire solide. L'irrigation manuelle permet précisément de contrôler la quantité d'eau appliquée et son emplacement (cuvette), ce qui est essentiel pour favoriser une croissance saine de l'arbre nouvellement planté. De plus, ce mode d'apport ne nécessite pas un investissement matériel important, contrairement au système intégré qui requiert la création de tranchées, l'installation de conduites, de systèmes de programmation et l'accès à un point d'eau.

Cependant, il est important de noter que l'irrigation manuelle peut être une tâche laborieuse, en particulier pour les grands espaces verts ou les zones avec de nombreux arbres (grandes villes). Des moyens logistiques et humains sont à mettre en place ce qui rend encore les interventions fastidieuses. Dans la plupart des villes, des camions citernes (Figure 2. 1) sont utilisés pour arroser les jeunes arbres nouvellement plantés compte tenu de plusieurs avantages qu'ils présentent en termes de flexibilité, de quantité d'eau distribuée et de nombre important d'arbres arrosés. Ils permettent aussi d'ajuster l'irrigation en fonction des besoins spécifiques des arbres et des conditions environnementales.



Figure 2. 1 : Arrosage des arbres par un camion-citerne au centre-ville de Lyon, Rue Garibaldi (photos prises par Kosso SENE le 10/07/2023)

Dans un climat en évolution rapide avec des phénomènes extrêmes de plus en plus fréquents et plus grave tels que les sécheresses et les vagues de chaleur, le besoin d’irrigation des jeunes arbres devient davantage important pour diminuer le risque de mortalité des jeunes arbres (Puhlmann et al., 2019). Toutefois, il y a quelques années les jeunes arbres pouvaient être plantés en hiver et ne nécessiteront pas d’arrosage en été, maintenant il est incontournable pour éviter le dépérissement d’après des gestionnaires de patrimoines (Lehnertz, 2022).

"Il y a 15 ans, on pouvait planter les arbres en hiver et on n'avait pas besoin de les arroser en été. La reprise se faisait. Il n'y avait pas de problème de dépérissement. Depuis 2018, on est obligés d'arroser les arbres en été sinon on perd les plantations réalisées pendant l'hiver. Les arrosages, ici, on les commence aux environs de la mi-mai jusqu'à la mi-septembre, à raison de 100 litres d'eau par arbre tous les 15 jours. C'est donc un travail considérable. Pour le moment, on arrose 1.800 arbres. Ce sont donc 600 arbres plantés l'hiver dernier et 1.200 arbres plantés cet hiver-ci. Et pour pouvoir mettre les 100 litres, tous les 15 jours, on a 3 camions citernes qui tournent en même temps : un camion-citerne de 10.000 litres et deux camions citernes de 5.000 litres. On a donc 3 équipes qui tournent en permanence et

c'est une nouvelle charge de travail qui est considérable" Gestionnaire du patrimoine arboré de la ville de Liège (Lehnertz, 2022).

Cependant, il est important de souligner que l'irrigation par camion-citerne doit être utilisée avec précaution pour éviter le gaspillage d'eau et de la main d'œuvre et assurer une utilisation efficace des ressources. Il est essentiel de planifier les passages aussi en fonction des besoins réels des arbres et d'éviter une irrigation excessive qui peut entraîner une stagnation de l'eau et des problèmes de pourrissement des racines. Pour une bonne maîtrise des apports ainsi qu'une bonne gestion de la ressource en eau, un suivi de la disponibilité en eau du sol tout au long de l'année est primordial (McCarthy et al., 2011; Canales-Ide et al., 2019; Gimpel et al., 2021) pour savoir quand et combien arroser. Lors du passage un débitmètre pour mesurer la quantité apportée est indispensable.



Figure 2. 2 : Tuyau d'arrosage avec le compteur d'eau au pied d'un arbre (photo prise par Kosso SENE le 10/07/2023)

Enfin, au fur et à mesure que les arbres s'établissent et développent un système racinaire solide, leur besoin en irrigation diminue. Une fois que les arbres ont atteint une certaine maturité et que les apports doivent être prolongés, d'autres méthodes d'irrigation, telle que l'irrigation automatique avec un système goutte à goutte, peuvent être utilisées pour maintenir un approvisionnement en eau adéquat et assurer les services fournis (rafraîchissement) pendant

les périodes caniculaires. Les événements caniculaires vécus en Europe ces dernières années replacent la question de l'irrigation des espaces verts (arbres matures) au centre des préoccupations sociales : arroser des végétaux durant une canicule peut dans certaines conditions amplifier leur effet rafraîchissant (Cheung et al., 2021).

1.2.2 Irrigation Automatique

Contrairement à l'approche manuelle, cette méthode fonctionne de façon programmée et automatique. Elle permet de fournir l'eau sans intervention humaine directe à l'aide de tuyaux, goutteurs, tuyères, turbines, ou autres systèmes installés au pied de l'arbre. Il existe plusieurs approches pour mettre en place un système d'irrigation automatique. Ces systèmes d'irrigation automatiques sont adaptés en fonction du type de strate tels que les arbres, les arbustes, les pelouses, les plantes vivaces pour répondre aux besoins spécifiques des végétaux (McCarthy et al., 2011; Litvak & Pataki, 2016).

Par exemple, l'irrigation par aspersion qui utilise des tuyères ou des turbines pour disperser l'eau, est couramment utilisée pour les pelouses et les massifs (Tapparo et al., 2019). L'irrigation goutte à goutte, qui délivre l'eau directement à la base des plantes, est souvent préférée pour les arbres et les arbustes (Mohamadzade et al., 2021). Ces systèmes permettent une application précise de l'eau, minimisant les pertes par évaporation et le ruissellement (voir Figure 2. 3 et Figure 2. 4).



Figure 2. 3 : Suivi d'arrosage de jeunes arbres urbains à Aix en Provence au sud de la France (photo prise par Kosso SENE le 26/05/2021)



Figure 2. 4 : Exemple de déploiement de systèmes d'irrigation automatique dans la motte et à l'extérieur de la motte (photo 1 : système goutte à goutte dans motte et système RWS 90cm à l'extérieur de la motte ; photo 2 : système RWS 90cm à l'extérieur de la motte ; photo 3 : Système goutte à goutte dans la motte et à l'extérieur)

Tableau 2. 1 : Les systèmes d'irrigation automatique

Systèmes d'irrigations	Description	Avantages
Irrigation goutte-à-goutte	L'eau est distribuée directement à la base des plantes par des goutteurs.	Économie d'eau, précision de l'arrosage, réduction des mauvaises herbes
Tuyères automatiques	Des arroseurs rotatifs ou oscillants sont utilisés pour arroser une large surface de jardin ou de pelouse.	Couverture uniforme, adapté aux grands espaces
Système d'irrigation par goutteurs	L'eau est absorbée par les racines des plantes grâce à des goutteurs placés dans le sol.	Réduction de la fréquence d'arrosage, économie d'eau
Système d'irrigation par micro-aspersion	De petits arroseurs pulvérisent de fines gouttelettes d'eau sur les plantes.	Convient aux plantes sensibles à l'humidité, contrôle précis de l'arrosage

1.3 Vers des restrictions d'irrigation face au changement global

Malgré plusieurs études sur l'utilisation efficiente de l'eau dans ce contexte de rareté accrue de la ressource hydrique, il arrive dans certaines zones où des restrictions sécheresses sont appliquées pour éviter l'épuisement total des nappes et par conséquent des coupures d'eau potable. En effet, lorsque certains seuils du niveau des nappes sont atteints, des mesures de restriction d'eau sont prises par les préfets pour éviter la sécheresse et assurer l'exercice des usages prioritaires, plus particulièrement la santé, la sécurité civile, l'approvisionnement en eau potable et la préservation des écosystèmes aquatiques (Ministère de la transition écologique, 2023).

1.4 Valorisation de l'eau pour l'irrigation des végétaux en ville

En dehors des déploiements de systèmes d'irrigations en ville, des stratégies sont mises en place pour une gestion efficiente de l'eau en l'occurrence la récupération de l'eau de pluie (S. Li et al., 2021) et la réutilisation des eaux usées traitées (Angelakis & Gikas, 2014) qui permettent d'éviter des restrictions. Ces approches permettent de réduire la dépendance à l'égard de l'eau potable, de minimiser le stress hydrique dans les zones urbaines mais aussi participer à l'effort de la transition écologique (Doll et al., 2022).

En effet, les systèmes de collecte des eaux pluviales, tels que les citernes de rétention et les bassins de rétention, sont utilisés pour stocker et réutiliser l'eau de pluie dans l'irrigation des végétaux en ville. Ces systèmes peuvent être intégrés à la conception urbaine pour récupérer l'eau des toits, des surfaces pavées ou des bassins de rétention. D'autres techniques de gestion de l'eau de pluie sont appliquées pour favoriser l'infiltration naturelle des eaux de surface tels que la création de zones perméables, l'enherbement des surfaces à nu, les aménagements adaptés comme des pentes, des noues, des fossés, etc. Actuellement, en plus de son utilisation pour irriguer les espaces verts, la gestion des eaux pluviales est davantage incontournable pour anticiper sur les conséquences néfastes des pluies en ville telles que le risques d'inondations et la recharge des nappes en cas de sécheresse (Barbosa et al., 2012). Elle réduit aussi la dépendance à l'égard de l'eau potable et de minimiser le stress hydrique dans les zones urbaines.

Toutefois, d'après l'Une³ la France apparaît en retard sur le sujet de la récupération de l'eau de pluie alors qu'elle est économique et vertueuse. Elle encourage le Gouvernement à rendre obligatoire l'installation d'une cuve de récupération d'eau de pluie pour les nouvelles constructions et pour les projets de rénovation.

Pour conserver davantage les précieuses sources d'eau potables et en même temps réduire les rejets d'effluents dans l'environnement et les coûts d'approvisionnement généraux, la réutilisation des eaux usées traitées est précieuse (Behzadian & Kapelan, 2015) pour une irrigation des espaces verts (Chung et al., 2021) et des cultures agricoles (Ahmali et al., 2020) durables. En effet, les volumes élevés de production quotidienne d'eaux usées domestiques, compris entre 14 et 225 L par personne dans le monde, ont incité le développement rapide du traitement et de la réutilisation de ces eaux dans de nombreux pays (Boyjoo et al., 2013).

Cependant, l'utilisation des eaux usées reste très peu développée en France d'après l'Une³. En effet, moins de 1% des eaux usées sont réutilisées dans l'hexagone, contre 14% en Espagne et 9% en Italie par exemple. L'Une³ a recommandé au Gouvernement de lever les freins réglementaires et de mettre en place une stratégie pour accroître la réutilisation des eaux usées dans les espaces verts. (UNEP, 2023).

Dans l'optique de limitation de l'usage d'eau potable pour l'arrosage, les stratégies de préventions suivantes aussi sont à privilégier :

³ <https://www.lesentreprisesdupaysage.fr/>

- Installer du paillage pour limiter l'évapotranspiration et des plantes couvre-sols pour conserver l'humidité et retarder l'arrosage,
- Grouper les espèces en fonction de leurs besoins en eau pour éviter le gaspillage et en privilégiant les espèces peu gourmandes ;
- Prendre en compte dans la planification de l'irrigation le type de végétation, les conditions climatiques locales, le type de sol et la disponibilité de l'eau.

Les avancées technologiques ont également contribué à l'évolution de l'irrigation des végétaux en ville et à la gestion de l'eau (Canales-Ide et al., 2019). Par exemple, des systèmes d'irrigation intelligents utilisant des capteurs avancés peuvent surveiller en temps réel les conditions du sol, les niveaux d'humidité et les prévisions météorologiques, ajustant automatiquement les paramètres d'irrigation pour une utilisation plus efficace de l'eau (Guntur et al., 2022; Pramanik et al., 2022; Vera et al., 2021).

En somme, l'irrigation des végétaux en ville a évolué pour s'adapter aux conditions spécifiques de l'environnement urbain. Les stratégies actuelles mettent l'accent sur l'utilisation de systèmes d'irrigation adaptés (Litvak & Pataki, 2016; McCarthy et al., 2011), une programmation efficace de l'arrosage (Canales-Ide et al., 2019), la gestion de l'eau de pluie (S. Li et al., 2021) et des eaux usées traités (Angelakis & Gikas, 2014) et l'utilisation de technologies de pointe pour une utilisation optimale de l'eau et la préservation de la santé des végétaux en milieu urbain. Cependant, la meilleure façon d'économiser la ressource en eau est le non arrosage, à privilégier en espaces verts. Ainsi, lorsqu'il est nécessaire d'irriguer, une gestion de l'eau s'impose pour évaluer les besoins et maîtriser les apports dans un objectif de réduction considérable de la consommation de la ressource. Dans cette perspective, une autre stratégie est ainsi nécessaire pour adapter convenablement les besoins en eau des végétaux en ville aux défis du changement global et par conséquent anticiper les conflits de demande de l'eau en ville en l'occurrence l'irrigation déficitaire.

2 Irrigation déficitaire : enjeux et concept

2.1 Enjeux de l'irrigation déficitaire

Les prélèvements d'eau à l'échelle mondiale pour répondre aux besoins des secteurs urbain, industriel et agricole ne cessent augmenter au cours de ces dernières années d'après le rapport sur l'état des ressources en eau dans le monde d'après l'organisation météorologique mondiale (OMM, 2022). Cela s'explique par le fait que la croissance démographique mondiale s'accroît

considérablement ainsi que l'accroissement du mode de consommation, mais aussi par l'insuffisante attention portée, jusqu'à présent, aux besoins en eau des écosystèmes. Étant donné que le plus grand enjeu de l'eau dans le monde est la rareté (Anderson et al., 2013), il existe une grande incertitude quant au niveau d'approvisionnement en eau pour les générations futures (Schlosser et al., 2014). Ainsi, la rareté de l'eau est un défi mondial (FAO, 2020).

La fréquence et l'intensité croissantes des événements météorologiques extrêmes dus aux changements globaux épuisent les réservoirs d'eau et diminuent les niveaux des eaux souterraines dans de nombreux coins du globe. D'après la FAO (2018), 70% des besoins des ressources mondiales en eau douce sont consommées pour la production agricole à travers l'irrigation. Étant donné les augmentations prévues de la demande alimentaire en raison de la croissance de la population mondiale, l'irrigation est primordiale pour assurer une production de nourriture suffisante et un environnement saint à l'avenir. Par conséquent, la gestion de l'eau d'irrigation dans ce contexte où elle devient davantage rare devra être effectuée de la manière la plus efficace, visant à économiser l'eau et à maximiser sa productivité (Anderson et al., 2013).

Pour rappel, l'irrigation est appliquée pour pallier les déficits hydriques pouvant diminuer la production végétale, en compensant la diminution de l'évapotranspiration (ET) des plantes (Penman, 1948), causée par le manque d'eau et permettant aux plantes de continuer à croître et à se développer de manière optimale (Fereres & Soriano, 2007). Cependant, dans les zones arides et semi arides où l'eau est un facteur limitant, il devient de plus en plus difficile de fournir aux végétaux suffisamment d'eau pour qu'ils transpirent à leur potentiel maximum et que les besoins en ET soient totalement satisfaits tout au long de la saison (J. C. Mailhol et al., 2004). Ainsi, un changement de paradigme sur l'utilisation de l'eau et la production optimale des cultures est nécessaire pour faire face aux dérèglements climatiques.

Pour lutter contre les effets néfastes du changement climatique résultant le déficit hydrique et de mauvaises conditions météorologiques, il est crucial de mettre en place des stratégies de gestions de l'eau beaucoup plus efficace permettant d'assurer une production durable et la préservation des ressources hydriques (Kirda & Kanber, 1999). Pléthore d'études embrassent d'ores et déjà cette problématique par la proposition de stratégies optimales pour une utilisation efficiente de l'eau en l'occurrence l'irrigation déficiente (Feldhake et al., 1984; Cabelguenne et al., 1995; Debaeke & Aboudrare, 2004; Fereres & Soriano, 2007; Abrisqueta J.M. et al., 2008; Jovanovic & Stikic, 2018; J. Zhang et al., 2021; Saad et al., 2023). La question de

l'irrigation concerne également l'environnement urbain, en termes de qualité et de quantité utilisée. Pour assurer les services écosystémiques bénéfiques à l'homme et à l'environnement (Nowak, 2018), les infrastructures vertes doivent participer à cet effort de préservation de l'eau par l'utilisation de la stratégie d'irrigation déficitaire.

L'irrigation déficitaire des végétaux en ville présente plusieurs enjeux importants, notamment la gestion efficace de l'eau, l'économie d'eau, la résilience des plantes, l'optimisation de la santé et de la productivité, ainsi qu'une gestion plus efficiente des ressources et des coûts. En adoptant des pratiques d'irrigation déficitaire appropriées, il est possible de répondre aux besoins des végétaux tout en préservant les ressources en eau et en favorisant la durabilité des espaces urbains. Cependant, il est essentiel de surveiller attentivement les besoins des plantes, d'ajuster les stratégies d'irrigation en fonction des conditions climatiques et des spécificités des espèces végétales, et de veiller à ne pas causer de stress hydrique excessif qui pourrait compromettre leur santé et leur développement.

2.2 Définition de l'irrigation déficitaire

L'irrigation déficitaire est une stratégie qui vise à fournir aux plantes une quantité d'eau inférieure à leurs besoins totaux en eau (c'est-à-dire 100% ET). Plutôt que de fournir une irrigation basée sur les besoins complets du végétal, l'irrigation déficitaire consiste à fournir une quantité d'eau réduite mais suffisante pour maintenir la croissance et la productivité des végétaux (Abrisqueta J.M. et al., 2008; Costa et al., 2007; Feldhake et al., 1984; Saad et al., 2023). Cette approche est basée sur la compréhension que les plantes peuvent tolérer temporairement un déficit hydrique sans compromettre leur rendement ou leur santé.

En effet, l'irrigation déficitaire repose sur une gestion précise de l'eau, en fournissant uniquement la quantité nécessaire pour maintenir la croissance des plantes. Cela nécessite une évaluation minutieuse des besoins en eau des végétaux, en tenant compte de facteurs tels que le type de plantes, les conditions climatiques, le type de sol et la phase de croissance de la plante (Alvarez et al., 2013, 2019). Des outils tels que les capteurs d'humidité du sol peuvent être utilisés pour surveiller le niveau d'humidité et déterminer le moment optimal pour l'irrigation.

2.3 Stratégies d'irrigation déficitaire

Il existe deux approches d'irrigation déficitaire utilisées en fonction des végétaux, des conditions environnementales et des ressources en eau disponibles à savoir l'irrigation

déficitaire régulée et l'irrigation partielle des racines (Beis & Patakas, 2015; Jovanovic & Stikic, 2018).

2.3.1 Irrigation déficitaire régulée

L'irrigation déficitaire régulée (IDR) consiste à fournir de l'eau d'irrigation aux plantes que pendant certaines périodes clés de leur cycle de croissance, en minimisant l'apport d'eau pendant d'autres périodes, permettant ainsi d'économiser de l'eau tout en maintenant une production adéquate (Himanshu et al., 2019). En effet, cette approche permet d'appliquer l'eau à différents stades de développement de la plante, l'eau est apportée pour répondre à l'évapotranspiration (ET) de la plante complète aux stades de croissance très critiques et ne pas l'appliquer aux stades de croissance non critiques (Ben-Gal et al., 2021). L'IDR exploite les stades phénologiques de la physiologie des arbres annuels permettant une application d'eau beaucoup plus faible que la satisfaction de la demande totale d'évapotranspiration des cultures pendant les périodes où le stress n'a pas ou peu d'effet sur les rendements (Fereres & Soriano, 2007).

L'objectif de cette approche est de maximiser l'efficacité de l'utilisation de l'eau en évitant les pertes par évaporation et en réduisant le lessivage des nutriments dans le sol. Exposer les plantes à un stress hydrique contrôlé permet d'encourager leur développement de systèmes racinaires plus profonds et plus étendus, ce qui les rend plus résistantes à la sécheresse (Drénou et al., 2006; Singh et al., 2023). De plus, le stress hydrique modéré peut également favoriser des réponses physiologiques et biochimiques bénéfiques pour les plantes, comme l'accumulation de composés protecteurs et l'amélioration de la santé du végétal. Pléthore d'études sur l'impact de l'irrigation déficitaire régulée sur plusieurs espèces fruitières par exemple rapportent que l'irrigation déficitaire régulée a une influence positive sur la qualité des fruits en plus elle n'a pas d'incident sur le rendement optimal des cultures (Motilva et al., 2000; Himanshu et al., 2019; Ben-Gal et al., 2021; F. Wang et al., 2023).

Cependant, l'irrigation déficitaire régulée implique de calculer avec précision la quantité d'eau à appliquer afin de maintenir les cultures dans une fourchette de stress hydrique contrôlé (Alvarez et al., 2013). Cela nécessite une connaissance approfondie des besoins en eau des cultures, des conditions du sol et des facteurs environnementaux tels que le climat et la disponibilité de l'eau (Himanshu et al., 2019). L'ajustement de l'irrigation en fonction des besoins spécifiques des végétaux et des stades de croissance est essentiel pour éviter un stress

hydrique excessif qui pourrait compromettre la santé et le rendement des plantes (Motilva et al., 2000; F. Wang et al., 2023).

De moult études s'intéressent à l'irrigation déficitaire régulée, notamment dans le domaine de la viticulture (Kovalenko et al., 2021; S.-H. Guo et al., 2021), de l'arboriculture (Spreer et al., 2007; Ben-Gal et al., 2021; Mira-García et al., 2023), des cultures maraîchères et céréalières (J. Zhang et al., 2021; Saad et al., 2023). Elle offre des avantages tels qu'une meilleure utilisation de l'eau, des économies d'eau significatives et une résilience accrue des cultures face aux conditions de sécheresse. Cependant, il est important de noter que cette approche nécessite une expertise et une planification minutieuse pour assurer une gestion appropriée de l'eau et des rendements satisfaisants des cultures.

2.3.2 Irrigation partielle des racines

L'irrigation partielle des racines (IPR) autrement dit séchage partiel de la zone des racines est une méthode où seule une partie des racines des plantes est irriguée (Nouna & Rezig, 2016), ce qui encourage le développement de racines plus profondes et permet une utilisation plus efficace de l'eau disponible. En effet, elle consiste à fournir de l'eau uniquement à une partie spécifique du système racinaire des plantes, plutôt que d'irriguer uniformément tout le sol. Dans cette approche, seule une partie des racines reçoit de l'eau, tandis que les autres parties restent dans des conditions de sécheresse contrôlée et vice versa (Chalmers et al., 1981; de Lima et al., 2015; Kriedemann & Goodwin, 2003).

L'objectif du séchage partiel de la zone des racines est de stimuler le développement d'un système racinaire plus étendu et plus profond, en incitant les racines à se développer activement vers les zones du sol où l'eau est disponible (Chalmers et al., 1983). En fournissant de l'eau uniquement à une partie limitée des racines, les végétaux sont encouragés à étendre leur système racinaire pour rechercher activement l'eau dans le reste du sol. Cela aussi permet aux plantes de mieux exploiter les réserves d'eau plus profondes et d'améliorer leur résistance à la sécheresse (Romero et al., 2004; Slamini et al., 2022).

Les approches pratiques de séchage partiel de la zone racinaire sont basées sur un mécanisme de signalisation racinaire (Beis & Patakas, 2015). En effet, les racines communiquent et interagissent avec les autres parties de la plante. La signalisation racinaire se produit par le biais de signaux chimiques, électriques et mécaniques. Par exemple, lorsque les racines détectent une faible disponibilité en eau dans le sol, elles peuvent produire des hormones (exemple acide abscissique (ABA) et cytokinines (Cks) des feuilles) et des métabolites

spécifiques qui sont transportés vers les parties aériennes de la plante, signalant ainsi la nécessité de réponses adaptatives telles que la fermeture des stomates pour réduire la perte d'eau par transpiration (Beis & Patakas, 2015).

Il y a deux manières de procéder à un séchage partiel il s'agit de séchage partiel fixe et alterné de la zone racinaire. Dans l'IPR fixe, la moitié du système racinaire est irriguée tout au long de la saison de croissance, tandis que l'autre moitié est exposée à l'assèchement du sol pendant toute la période de croissance. Dans l'IPR alternée, l'arrosage et le séchage des parties de la zone racinaire sont modifiés, ce qui permet au côté humide de la racine de sécher et au côté sec d'être entièrement irrigué (Jovanovic & Stikic, 2018). L'irrigation partielle des racines présente plusieurs avantages. Elle permet une utilisation plus efficace de l'eau, car seules les racines actives reçoivent de l'eau, réduisant ainsi les pertes par évaporation et le lessivage des nutriments. Elle favorise également le développement d'un système racinaire plus résilient et adapté aux conditions de sécheresse, ce qui peut améliorer la tolérance des plantes au manque d'eau.

De même que l'irrigation déficitaire régulée et parfois combinées, l'irrigation partielle des racines est utilisée dans diverses cultures, notamment les arbres fruitiers (Abrisqueta J.M. et al., 2008; Romero-Conde et al., 2014; Spreer et al., 2007), les vignes (Beis & Patakas, 2015; Intrigliolo & Castel, 2009), les cultures maraîchères (Liu et al., 2020; Zegbe-Domínguez et al., 2003) et les cultures céréalières (Karandish & Shahnazari, 2016). Cependant, sa mise en œuvre nécessite une planification précise, une connaissance approfondie des besoins en eau des cultures et des caractéristiques du sol, ainsi qu'une surveillance régulière pour s'assurer que les racines reçoivent la quantité d'eau qu'il faut tout en évitant un stress hydrique excessif. L'irrigation partielle des racines peut être appliquée à partir de différents systèmes d'irrigation (goutte-à-goutte, sillon, micro-asperseur, etc.) en fonction de l'espèce, de la texture du sol ou des variables climatiques.

3 Irrigation déficitaire en ville :

L'irrigation déficitaire a été appliquée avec succès en agriculture dans les pays arides et semi arides (J. C. Mailhol et al., 2004; Rao et al., 2016) puis dans des zones à climat humides pour une utilisation efficiente de l'eau. Le concept fait de peu d'études dans les environnements urbains. Cependant, ces dernières années, plusieurs chercheurs commencent à s'intéresser à l'utilisation de la stratégie d'irrigation déficitaire en ville et leurs effets sur les végétaux

(Cabrera et al., 2013; Martin et al., 2018; Alvarez et al., 2019; Tapparo et al., 2019; Mohamadzade et al., 2021; Schütt et al., 2022; Cheng et al., 2023).

Dans les environnements urbains, les ressources en eau peuvent être limitées et soumises à des restrictions en raison de la demande croissante et de la disponibilité limitée (Ministère de la transition écologique, 2023). L'irrigation déficitaire permet une utilisation plus judicieuse de l'eau en fournissant aux végétaux seulement la quantité d'eau nécessaire pour maintenir leur croissance et leur santé, sans gaspillage (Cabrera et al., 2013). Elle permet de réduire la quantité totale d'eau utilisée pour l'arrosage des végétaux en ville (Cirillo et al., 2013). En fournissant aux plantes une quantité d'eau suffisante mais contrôlée, il est possible de réaliser des économies d'eau significatives, ce qui est bénéfique pour les ressources en eau et l'environnement dans son ensemble (Alvarez et al., 2013).

L'irrigation déficitaire peut également contribuer à la résilience des végétaux en ville. En soumettant les plantes à un stress hydrique modéré et contrôlé, elles développent des mécanismes de résistance et d'adaptation aux conditions environnementales difficiles (Alvarez et al., 2019). Les végétaux peuvent développer des systèmes racinaires plus profonds pour prospecter l'eau en profondeur, pour une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau et une tolérance accrue au stress hydrique (Rao et al., 2016). Cela les rend plus robustes face aux fluctuations de l'approvisionnement en eau et aux conditions climatiques changeantes. Les travaux de Rao et al (2016) rapportent que l'application de l'irrigation à 60% ET a produit des racines significativement plus longues que les autres traitements de confort en eau. Les racines sont restées confinées à la faible profondeur sous le traitement dans lequel l'eau d'irrigation a été appliquée à 100% ET tout au long de la période de l'expérimentation. L'irrigation déficitaire est également appliquée aux végétaux depuis la pépinière pour obtenir des plantes ornementales bien adaptées et de qualité en contrôlant leur croissance et en renforçant leur système racinaire. Sánchez-Blanco et al (2019) avancent que l'ID permet une utilisation plus efficace de l'eau et favorise l'établissement rapide des plantes dans leur environnement futur. De plus, elle offre des avantages tels que l'économie de ressources et l'absence de régulateurs de croissance. En ajustant les stratégies d'irrigation en fonction de chaque espèce, il est possible de maximiser les bénéfices de l'irrigation déficitaire pour la production de plantes ornementales.

Une autre contribution cruciale est l'optimisation de la santé et de la productivité des végétaux en ville. L'irrigation déficitaire, lorsqu'elle est appliquée de manière adéquate, favorise une

croissance contrôlée et équilibrée des plantes. Des études montrent que les végétaux conservent une santé et une apparence acceptable lorsqu'elles sont soumis à une irrigation déficitaire (Kjelgren et al., 2000; Scheiber & Richard C. Beeson, 2007; Sun et al., 2012; Caser et al., 2017; Hartin et al., 2018). En effet, elle permet de maintenir des niveaux raisonnables d'humidité dans le sol, favorisant ainsi le développement des racines, l'absorption des nutriments et la photosynthèse. Les plantes peuvent ainsi rester saines et produire des rendements satisfaisants, contribuant à l'amélioration de la qualité de l'environnement urbain. Caser et ses collaborateurs (2017) ont évalué les effets de différents régimes d'irrigation (stress hydrique modéré (50%ET) et sévère (25%ET)) sur les plantes *Primula vulgaris* en pot. Les résultats ont montré que le stress hydrique modéré n'a pas eu d'impact significatif sur la croissance des plantes, mais les plantes soumises au stress hydrique étaient plus efficaces dans l'utilisation de l'eau. Les plantes témoins et celles avec un stress hydrique modéré ont produit le plus grand nombre de fleurs entièrement ouvertes. Ainsi, un stress hydrique modéré peut être appliqué pour économiser l'eau tout en maintenant la performance et la qualité ornementale des plantes *Primula vulgaris* en pot.

Enfin, l'irrigation déficitaire peut également favoriser une gestion plus efficiente des ressources et des coûts (Nouri et al., 2013). En France, pour assurer le développement des végétaux et répondre à leurs besoins en eau, 11% du budget général de fonctionnement du SEV (service des espaces verts) est consacré à l'irrigation des espaces verts dans les communes du sud de la France contre 3% dans le Nord d'après une enquête de plante & cité (Ruaud et al., 2013). En effet, cette enquête a été menée en 2013 par des acteurs de l'espace vert en France en collaboration avec plante & cité (2023), sur l'évolution des pratiques et des modes de gestion de l'arrosage des espaces verts de 57 communes réparties sur toute la France. D'ailleurs le rapport de l'UNEP (2020) à travers l'observatoire des villes vertes stipule que le budget moyen par habitant dédié aux espaces verts par les 50 premières grandes villes de la France s'élève à 76€. Aux États-Unis, entre 40% et 70% de l'eau utilisée en milieu urbain est destinée aux plantations d'espaces verts (Hartin et al., 2018). Ainsi, en réduisant les besoins en eau et les coûts associés à l'irrigation, les budgets des collectivités peuvent être mieux gérés.

Toutefois, l'irrigation déficitaire peut avoir des effets néfastes sur les végétaux en ville, compromettant leur croissance, leur santé et leur capacité à résister aux maladies et aux ravageurs lorsqu'elle est appliquée de manière très sévère. Une gestion équilibrée de l'irrigation, en prenant en compte les besoins spécifiques des plantes et les conditions

environnementales, est essentielle pour assurer leur survie et leur vitalité dans les environnements urbains.

Conclusion

Ce chapitre met en lumière l'importance de la gestion efficiente de l'eau d'irrigation dans le contexte actuel de changement climatique où la rareté de l'eau devient de davantage préoccupante. Les végétaux en milieu urbain, malgré les services inestimables qu'ils offrent à l'homme et à l'environnement, nécessitent une utilisation judicieuse de l'eau pour garantir leur santé et durabilité. L'approche de l'irrigation déficitaire, mise en avant dans cette étude, émerge comme une stratégie prometteuse pour renforcer la résilience des végétaux en milieu urbain. En soumettant les plantes à un stress hydrique modéré et contrôlé, cette méthode encourage le développement de mécanismes de résistance et d'adaptation aux conditions environnementales difficiles. Par conséquent, les végétaux développent des systèmes racinaires plus profonds, améliorant ainsi leur capacité à puiser l'eau en profondeur, tout en optimisant l'utilisation de cette précieuse ressource et en augmentant leur tolérance au stress hydrique.

Toutefois, il est essentiel de noter que l'irrigation efficace ne constitue qu'une facette de la gestion de l'eau en milieu urbain. D'autres approches de valorisations de l'eau telles que la réutilisation des eaux usées traitées et la récupération des eaux de pluie devraient être intégrées de manière complémentaire pour garantir une gestion durable des ressources hydriques en milieu urbain. La réutilisation des eaux usées traitées permet non seulement d'économiser de l'eau douce, mais aussi de réduire les impacts environnementaux liés au rejet des eaux usées. De même, la récupération des eaux de pluie offre une source alternative d'approvisionnement en eau, réduisant la pression sur les ressources en eau conventionnelles.

L'application judicieuse de l'irrigation déficitaire devrait être intégrée aux pratiques de gestion des végétaux en milieu urbain. Cela permettra non seulement de maximiser l'efficacité de l'irrigation, mais également de favoriser la santé à long terme des végétaux tout en contribuant à la préservation de l'eau, devenue une ressource de plus en plus rare. Cette approche innovante offre ainsi une voie vers des écosystèmes urbains plus durables, résilients et adaptés aux défis croissants posés par le changement climatique. Ces approches contribuent aussi positivement sur les décisions des autorisés pour la restriction de l'irrigation des espaces verts en milieu urbain qui devenu de plus en plus fréquente dans les villes.

Chapitre 3 : De la donnée multifactorielle à l'aide à la décision

1 Vision polysémique de l'aide à la décision

1.1 Historique de l'aide à la décision

L'aide à la décision a fait l'objet de plusieurs études dans le passé (Bowen, 2004; Chapagain, 2013). La période un peu antérieure à la deuxième guerre mondiale a plus marqué ce tournant lors des études menées par l'armée britannique sur les systèmes de radar et le décodage du code secret des communications allemandes (Bowen, 2004). En effet, la recherche opérationnelle a émergé pendant la Seconde Guerre mondiale, lorsque des scientifiques et des mathématiciens ont été sollicités pour résoudre des problèmes complexes liés à la logistique militaire, à la planification des opérations et à la prise de décision stratégique (Bowen, 2004). Depuis, les scientifiques continuent à trouver des solutions aux problèmes liés à la prise de décision par les personnes, les organisations et les institutions auxquels le concept de décision est central (Tsoukiàs, 2006).

L'aide à la décision a connu un tournant spectaculaire pendant cette période où pléthore d'études s'intéressent à la théorie de la décision (Winterfeldt, 1980; Tamura et al., 2000; Tsoukiàs, 2006; Varenne et al., 2018). Ces études essayent d'apporter des solutions aux problèmes liées à l'activité humaine de manière générale. Cependant, ces solutions ou prescriptions sont longtemps considérées comme des "ordres" en se basant sur l'hypothèse que la conception des outils de solutions est faite indépendamment du décideur et du processus de décision. Ces outils ont été conçus ou utilisés dans une logique de substitution et non d'aide au décideur.

D'autres études d'aide à la décision paraissent vers les années 60 pour montrer l'importance de prendre en compte le décideur et le processus de décision dans les modèles et outils d'aide à la décision. En l'occurrence, (Simon, 1956, 1979) favorisait dans sa réflexion les activités mentales qu'un décideur doit effectuer pour prendre une décision. Pour lui, si la façon dont le décideur pense est bien comprise, on pourra mieux l'accompagner dans sa décision. C'est dans cette logique que les sciences cognitives et la psychologie apporteront des contributions majeures à l'avancement de la théorie de la décision. La façon dont la décision est conçue paraît donc difficilement séparable du processus de décision du moment où l'ensemble des étapes du processus détermine la décision finale (Roy, 1993).

La théorie de la décision étudie le processus de prise de décision humaine et vise à comprendre comment les individus et les organisations prennent des choix face à des situations complexes et incertaines. Elle propose des modèles et des méthodes pour évaluer les options disponibles, comparer les coûts et les avantages, et identifier la meilleure décision possible en fonction des

objectifs et des contraintes (Kast, 1993). Ainsi, la théorie de la décision est abordée à partir de l'approche descriptive c'est à dire le processus permettant de comprendre et de reproduire la façon dont l'humain procède pour prendre une décision et de l'approche prescriptive permettant d'accompagner le décideur dans sa prise de décision à partir des connaissances et de méthodes de conception d'outils avec les mathématiques, l'informatique et les sciences de l'ingénieur (Bouyssou et al., 2015).

Cette théorie repose sur l'idée que les décideurs cherchent à atteindre certains objectifs ou à maximiser leur satisfaction, leur profit, ou leur utilité. Cependant, les décisions sont souvent confrontées à des incertitudes, des risques, des préférences individuelles, et des limitations cognitives. La théorie de la décision cherche à modéliser ces éléments pour mieux comprendre comment les décisions sont prises dans la réalité (Tsoukiàs et al., 2010).

1.2 Définition de la décision

Prendre une décision est un acte posé par tous et presque tous les jours. Nous prenons des décisions sans arrêt, des plus simples « Je prends la voiture ou le vélo » au plus complexe « Comment appliquer l'accord sur le nucléaire ? ». On parle de décision lorsqu'un acteur (ou un groupe d'acteurs) effectue un choix entre plusieurs solutions susceptibles de résoudre le problème ou la situation à laquelle il est confronté. Il est important d'étudier comment cette décision est prise et les mécanismes du cerveau mobilisés notamment au travers des processus mentaux aboutissant à une bonne solution. Schneider et Shiffrin (1977) ont étudié des modèles qui représentent ces processus mentaux en les séparant en deux types : un processus automatique et un processus contrôlé.

On parle de processus automatique lorsque la décision est exécutée rapidement de façon autonome, irrépressible et inconsciente nécessitant pas de ressources additionnelles (exemple : prendre une décision sur une action reflexe pour éviter un obstacle). Alors que le processus contrôlé est exécuté lentement de façon délibérée et consciente et il nécessite beaucoup de ressources additionnelles. Ce processus fait appel à des stratégies cognitives contrôlées avec une analyse consciente de la solution en mobilisant des ressources externes pour une prise de décision. Dans cette même perspective Tversky et Kahneman (1977) ont étudié le comportement du décideur à travers les biais cognitifs ou mécanisme de la pensée qui cause une déviation du jugement.

Un autre point important à prendre en compte dans le processus de décision est l'incertitude qui affecte tout problème décisionnel puisque par nature une décision concerne des événements futurs alors ce n'est pas possible d'admettre toutes les conséquences émanant de la décision

(Tsoukiàs, 2007). Les processus mentaux utilisés ainsi que les biais associés dépendent du problème décisionnel auquel le décideur est confronté.

1.3 Différents types de décisions : stratégiques, tactiques et opérationnelles

En fonction de l'impact et de la portée, les décisions peuvent être classées en différentes catégories (Igor Ansoff, 1987) : stratégique, tactique et opérationnelle (Figure 3. 1). D'abord, les décisions stratégiques qui sont de haut niveau et ont un impact à long terme (exemple en espace vert, une décision stratégique sur la vision et la politique des grandes orientations de la gestion des espaces verts à long terme pour la préservation, l'aménagement et l'entretien). Ensuite, les décisions tactiques qui sont de niveau intermédiaire et ont une implication sur le court et moyen terme avec des conséquences importantes. En agriculture par exemple, ces décisions concernent la gestion des ressources, telles que l'irrigation, la fertilisation, la gestion des parasites et des maladies. Cependant, elles ont un impact direct sur la productivité et la rentabilité de l'exploitation à court terme. Enfin, les décisions opérationnelles qui sont des choix concrets et pratiques pris au niveau quotidien pour mettre en œuvre les décisions tactiques et stratégiques. Elles concernent les activités quotidiennes, la gestion des ressources, la résolution de problèmes et la surveillance des performances afin d'assurer le bon fonctionnement de l'organisation (ex : appliquer une quantité d'eau au pied d'un arbre par un ouvrier suite à la demande du gestionnaire). Dans le cadre de cette thèse nous nous intéressons plus sur les décisions tactiques.

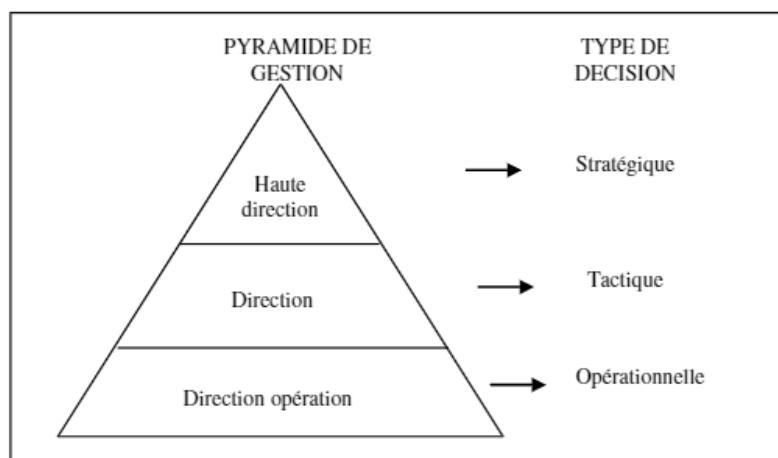


Figure 3. 1 : les différents niveaux de décision (Igor Ansoff, 1987)

1.4 Définition de l'aide à la décision

L'aide à la décision est une activité permettant de faciliter la structuration et le traitement de l'information à partir des méthodes, modèles, approches spécifiques dans le but d'éclairer et d'accompagner le décideur dans sa prise de décision. Elle est ainsi définie par (Roy, 1985)

comme étant « *l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponses aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision* ». Elle cherche alors d'après l'auteur à éclairer et à accompagner les décideurs vers des décisions qu'ils auront la responsabilité de prendre.

L'aide à la décision amène à un rapport de prescription particulier entre l'acteur d'une part et celui qui d'autre part conduit le processus d'aide à la décision appelé « homme d'étude » ou « aidant » (Roy, 1985). L'homme d'étude est appelé à formaliser le problème de décision, à définir les alternatives possibles et leurs conséquences respectives, à élaborer des critères d'évaluation, ou encore à collecter des informations sur les préférences subjectives du décideur. Cette phase demande une attention particulière de la part de l'homme d'étude permettant au décideur de parvenir à une décision la plus appropriée constituant en réalité la théorie de la décision (Winterfeldt, 1980; Mingers & Rosenhead, 2004).

En raison de sa complexité, le processus d'aide à la décision incite les chercheurs à se poser des questions pour éclairer les décideurs. Bouyssou et al (2015) perçoivent l'aide à la décision comme une démarche qui vise à réduire l'incertitude. Selon eux, cette approche consiste à fournir des informations permettant une meilleure évaluation des possibilités et une anticipation plus précise des résultats des actions envisagées, afin de favoriser les discussions autour de la table plutôt que sur le terrain. Ainsi, la réduction de l'incertitude dans le processus décisionnel est un aspect crucial de la définition de l'aide à la décision selon (Courbon, 1982).

Plus récemment, Meinard et Tsoukiàs (2022) considèrent l'aide à la décision comme une discipline qui combine à la fois la science et la pratique en vue de fournir des recommandations aux décideurs lorsqu'ils font face à des problèmes, en s'appuyant sur les connaissances théoriques disponibles et les données empiriques. Bien que cette activité soit souvent associée à la résolution de problèmes mathématiques et à la conception d'algorithmes, elle demeure avant tout une démarche empirique et socialement encadrée, où les interactions entre les décideurs et les analystes, ainsi qu'entre eux et les parties prenantes, jouent un rôle crucial. L'aide à la décision n'a en aucun moment le but de se substituer aux décideurs tout en leur proposant des solutions “toutes faites”.

Aujourd’hui, les activités de recherche en « aide à la décision » concernent de très nombreux domaines (Tamura et al., 2000; Aksoy et al., 2012; Navarro-Hellín et al., 2016; Car, 2018; Varenne et al., 2018; Ghavami et al., 2022; Kang et al., 2023) :

- La représentation des connaissances qui englobent la structuration, l'organisation et la formalisation de la connaissance en utilisant des ontologies, des bases de connaissances, des systèmes d'experts, etc.
- La compréhension des processus de décision humains passant par les sciences cognitives et psychologiques, étudiant les mécanismes de décision individuelle et collective, la modélisation des préférences et des croyances, ainsi que les approches multi-agents. De plus, la recherche se penche sur le fonctionnement du cerveau en explorant les réseaux de neurones, la robotique et l'apprentissage automatique ;
- Le domaine de recherche implique le développement d'algorithmes de traitement de l'information, tels que la propagation de l'information, le traitement des préférences, la logique et la logique floue. De plus, des efforts sont faits pour concevoir des techniques d'optimisation comme les algorithmes génétiques.

L'aide à la décision répond à une problématique décisionnelle par une activité de mise en forme des connaissances scientifiques, environnementales, politiques, psychologiques considérant le périmètre (environnement) décisionnel (Figure 3. 2) pour aboutir à un outil qui met en lumière des choix de décisions.

Il y a énormément de problème de grandes variétés, il est donc illusoire de penser pouvoir les résoudre avec la même méthode ou la même approche. Dans toute démarche d'aide à la décision il est d'abord important de bien analyser le problème décisionnel, pour cela il faut savoir :

- Qui sont les décideurs ? Il y en a un ou plusieurs
- Dans quel environnement il va décider
- Quels sont les paramètres liés aux problèmes décisionnels :
 - Processus décisionnel : Est-ce qu'il y a une chaîne de production ou une personne isolée
 - Dans quel état mental il prend la décision
 - Quelles sont les données disponibles
 - Quelles sont les contraintes susceptibles d'affecter la décision
 - Quels sont les critères et les objectifs que peuvent avoir les décideurs
 - Quelle est la connaissance dont il dispose

- Quel est le temps pour la décision
- Quelles sont les alternatives possibles

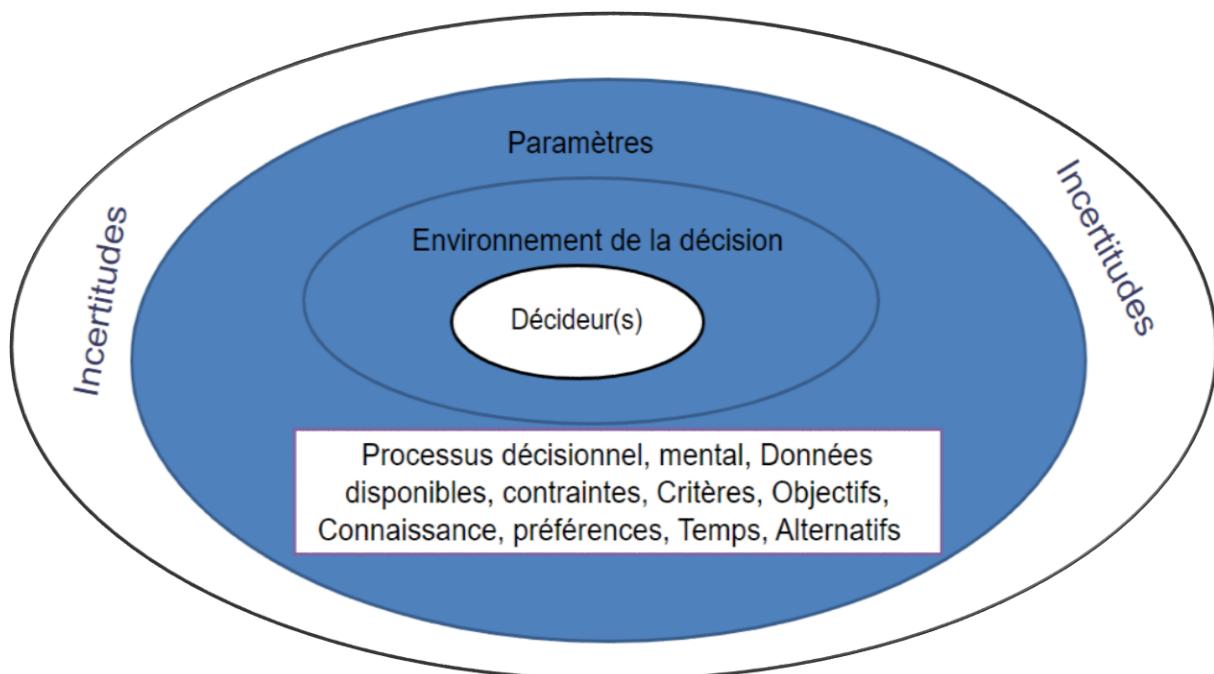


Figure 3. 2 : Périmètre décisionnel du décideur

2 Modélisation et aide à la décision

La modélisation est un processus qui permet de représenter un système ou un phénomène du monde réel sous forme de modèle, c'est-à-dire une abstraction par exemple mathématique ou informatique qui permet de simuler le comportement du système et d'explorer différentes situations (Varenne et al., 2018). Ce processus consiste à mettre en place un modèle qui, selon Minsky (1965) et de façon simple, est défini comme une représentation simplifiée du système réel à travers des équations mathématiques, des algorithmes informatiques, des diagrammes ou d'autres méthodes. Ce modèle permet de décrire comment les différentes variables ou composants du système interagissent entre eux et comment ils évoluent au fil du temps.

Elle est incontournable dans de nombreux domaines, tels que les sciences physiques pour comprendre les systèmes complexes et optimiser les processus industriels (Sercombe et al., 2020; De Smedt et al., 2023), les sciences sociales pour modéliser les choix des populations ou sonder l'opinion publique (Liebe & Meyerhoff, 2021), l'ingénierie (Eicker, 2019), la biologie

(Merchuk et al., 2011), la météorologie pour pouvoir prédire la météo et les évènements de catastrophes naturelles (Zhao & Liu, 2021; Szturc et al., 2022), et bien d'autres domaines.

Elle permet aux scientifiques, ingénieurs et décideurs de mieux comprendre les systèmes complexes (Marilleau, 2016), d'explorer différentes hypothèses et de tester des scénarios avant de prendre des décisions. Il est primordial de savoir que la modélisation simplifie la réalité et qu'elle repose sur des hypothèses et des approximations. Les modèles ne sont pas des copies exactes du monde réel, mais ils permettent de simuler les principaux mécanismes et comportements du système étudié. Ils sont utilisés dans ces domaines pour prédire des tendances, évaluer des stratégies, et optimiser des processus.

L'objectif de la modélisation est souvent de fournir une aide à la décision en formalisant le phénomène via un modèle (Moretti et al., 2016) et des techniques de modélisation des décisions (Car, 2018). Cependant le modèle reste un moyen et ne remplace pas le jugement humain. Il est important alors de ne pas oublier leur caractère d'abstraction. Certes, les modèles ne peuvent pas tout simuler ou prédire avec certitude, mais ils peuvent fournir une aide précieuse pour mieux comprendre les enjeux, évaluer les options et identifier les meilleures stratégies possibles.

2.1 Modèles d'aide à la décision

D'après Marvin Minsky (1965) : “*Pour un observateur B, un objet A* est un modèle d'un objet A, dans la mesure où B peut utiliser A* pour répondre à des questions qui l'intéressent au sujet de A*”. En d'autres termes, un modèle est une représentation, d'une situation avec un nombre fini de paramètres, simplifiée d'un système réel ou imaginaire et faite par quelqu'un et pour quelqu'un afin de l'aider dans son action. On parle de la triade de Minsky “*Objet, Modèle et Observateur*”. “*L'objet*” désigne un système réel ou imaginaire, “*l'Observateur*” représente toute créature capable de réfléchir sur elle-même et sur le monde (ex : Homme) et le “*Modèle*”, l'entité qui se substitue à l'objet dans la réflexion de l'observateur.

Dans l'aide à la décision, le modèle y occupe une place cruciale (Bossel, 1994). En effet, il constitue le moyen essentiel pour représenter et analyser les systèmes, permettant ainsi aux décideurs (ou intermédiaires (experts) dans la plupart des cas) de mieux comprendre les interactions entre les différents éléments d'un problème et d'explorer différentes options avant de prendre une décision (Bittanti, 2019). Dès lors, dans le processus d'aide à la décision, il faut définir clairement le problème et à identifier les objectifs à atteindre, ensuite, collecter et analyser les données pertinentes pour le problème en question. C'est à ce stade que le modèle

entre en jeu, car il permet de traduire les informations recueillies en une représentation formelle du système à étudier (Bontempi, 2021).

Dans la littérature, plusieurs approches sont avancées pour la mise en place d'un modèle (Pärn, 2022). Cependant, deux grandes approches se distinguent pour modéliser un processus, les approches mécanistes et les approches statistiques (Chalabi, 1998; Baker et al., 2018).

2.1.1 Approche mécaniste

L'approche mécaniste est utilisée dans différentes disciplines scientifiques pour décrire et comprendre le fonctionnement interne des systèmes complexes et les modèles qui y découlent se fondent sur des principes physiques, biologiques ou chimiques bien établis. Des équations mathématiques sont utilisées dans cette approche pour décrire les interactions entre les différentes composantes du système complexe (Fister, 2004; X.-S. Yang, 2017). Ainsi, la construction de ces modèles, reposant sur des fondements théoriques solides, permet de simuler le comportement du système dans différentes conditions et faire des prédictions sur la base de lois scientifiques établies (X.-S. Yang, 2017).

Les modèles mécanistes sont incontournables car ils permettent d'étudier des phénomènes qui ne sont pas facilement observables dans la réalité, ou d'explorer le comportement du système même dans des situations extrêmes (Baker et al., 2018). Le modèle développé, pour la première fois dans le domaine de la biologie, par Hodgkin & Huxley (1952) pour décrire la génération du potentiel d'action nerveux est un exemple réussi de modélisation mécaniste. Ce modèle explique la dynamique des canaux ioniques indépendants et a été calibré et validé à partir d'expériences pour déterminer les paramètres des canaux ioniques. Le travail de Hodgkin & Huxley, prix Nobel de médecine en 1963, a été largement utilisé et a considérablement avancé la compréhension de l'activité électrique des cellules et des organismes unicellulaires aux neurones du cerveau. Leur modèle a ouvert la voie à de nombreuses recherches en mathématiques appliquées pour dériver des modèles simplifiés.

Dès lors, les modèles mécanistes sont fréquemment utilisés en biologie végétale, en écologie, en physique, en chimie et dans d'autres domaines scientifiques (Ducheyne et al., 2001; Jones et al., 2016; Fitzpatrick et al., 2019; K. H. Lee et al., 2023). Par exemple, en écologie, les modèles mécanistes permettent de comprendre les dynamiques des écosystèmes, l'effet des changements climatiques sur les communautés biologiques, ou encore l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement (Kellomäki & Väistönen, 1997; Knapp et al., 2002; Pretzsch et al., 2015; Zakharova et al., 2019). En agriculture, plusieurs études de modélisation sont faites

en utilisant le processus mécaniste pour représenter la relation et le fonctionnement des systèmes vivants dans le continuum sol, plante et atmosphère (Brodrribb & Mencuccini, 2017; Norman et al., 2022).

Ce processus est utilisé pour comprendre les mécanismes physiologiques des végétaux et prédire leur croissance (Endy & Brent, 2001). Par exemple, en ce qui concerne le fonctionnement de l'eau dans les continuum sol, plante et atmosphère, des modèles mécanistes ont été développés pour étudier la transpiration (Sinclair et al., 2014; Xing et al., 2023), la photosynthèse, la régulation de l'ouverture des stomates et l'absorption d'eau par les racines (Blatt et al., 2022). Ces modèles prennent en compte des paramètres tels que la conductance stomatique, la pression de vapeur d'eau dans l'atmosphère, la disponibilité en eau dans le sol, et les propriétés physiologiques spécifiques de chaque espèce végétale (Vanderborght et al., 2023). Ils permettent aux chercheurs de mieux comprendre les réponses des plantes aux variations environnementales telles que la sécheresse, la température et la lumière, et d'évaluer l'efficacité des stratégies d'irrigation dans l'agriculture et la gestion des ressources en eau, on parle également des modèles de cultures (Brisson, 2009; Cheviron et al., 2016; Šimůnek et al., 2016; J.-C. Mailhol et al., 2018; Hamze et al., 2023; Lazarovitch et al., 2023).

Ainsi, le processus mécaniste de la modélisation du continuum sol, plante et atmosphère permet de prédire les besoins en eau des cultures, d'optimiser les pratiques d'irrigation, de mieux comprendre l'impact des variations climatiques sur l'eau disponible pour les plantes, et de soutenir la prise de décision éclairée en matière de gestion des ressources en eau et de l'agriculture. Cependant, la construction de modèles mécanistes peut être complexe du point de vue physique ou biologique (van Riel, 2006) et l'acquisition de données, basée sur l'expérimentation requérant souvent plusieurs années, pour paramétriser les équations du modèle et tester sa validité (X.-S. Yang, 2017).

2.1.2 Approche statistique

La modélisation statistique est une approche d'analyse des données dont l'objectif est de décrire, d'expliquer et de prédire des phénomènes en utilisant des modèles mathématiques basés sur des méthodes statistiques. Ces méthodes sont largement appliquées dans divers domaines, de la science génomique (infiniment petit) à la science astrophysique (infiniment grand), du plus industriel comme le contrôle de qualité au plus théorique par exemple enquêtes en sciences humaines ou études biologiques, médicales et pharmaceutiques, et du plus

alimentaire comme les études agronomiques et agro-alimentaire au plus divertissant comme les prédictions d'audiences (Tufféry, 2017). Elle n'épargne aucun domaine scientifique.

Selon (Tufféry, 2017; Bontempi, 2021), l'approche statistique est un processus impliquant plusieurs étapes allant de la collecte des données jusqu'à l'utilisation du modèle validé. L'acquisition et l'exploration des données sont les premières étapes où des données pertinentes sont collectées à partir d'observations, d'enquêtes, d'expériences, ou d'autres sources. Ces données seront explorées pour en comprendre la structure, les caractéristiques et les relations entre les variables. Ensuite, une méthode statistique appropriée est choisie en fonction de l'objectif de la modélisation allant de la plus simple comme la régression linéaire simple aux plus complexes comme les réseaux de neurones ou les méthodes d'apprentissages automatiques. Une fois la méthode choisie, les paramètres de la méthode sont estimés à partir des données à l'aide de techniques d'estimation statistique, puis la méthode est évaluée pour vérifier sa performance et sa capacité à représenter les données de manière adéquate. Cela peut impliquer l'utilisation de tests statistiques, de métriques d'évaluation, et de techniques de validation croisée. Enfin, le modèle mis en place peut être utilisé, une fois validé, pour faire des prédictions sur de nouvelles données, prendre des décisions éclairées ou obtenir des informations pertinentes.

Ainsi, la modélisation statistique est une approche puissante pour analyser et prédire des phénomènes complexes afin d'aider à la prise de décision dans un large éventail de domaines. En agriculture par exemple, des modèles statistiques tels que la régression multiple ou les méthodes d'apprentissage automatique comme les réseaux de neurones sont appliqués dans des études pour prédire le rendement des cultures en fonction de facteurs tels que la météo, le type de sol, l'humidité, les pratiques agronomiques et d'autres facteurs non agronomiques (Krause, 2008; Chlingaryan et al., 2018; Romanovska et al., 2023) et pour évaluer les impacts à court et long terme du changement climatique sur la productivité agricole (Gornott & Wechsung, 2016; Y. Li et al., 2019; van Klompenburg et al., 2020). Les modèles statistiques sont utilisés aussi pour optimiser les pratiques d'irrigation en fonction des conditions climatiques, de la demande en eau des cultures, des caractéristiques du sol et d'autres paramètres, afin de privilégier une utilisation efficiente de l'eau (Dubois et al., 2021; Gao et al., 2023). En botanique, des modèles de croissance basés sur des équations mathématiques et/ou des données de terrain sont employés pour reproduire sous forme virtuelle la croissance de la plante en prenant en compte un grand nombre de différents facteurs et processus interagissant entre eux afin de prédire leurs croissance et développement (Dupuy, Vignes, et al., 2010; Ding et al., 2021).

L'approche statistique offre, ainsi, une grande flexibilité et peut être appliquée à divers aspects de domaines donnés pour mieux comprendre les interactions complexes entre les facteurs, et pour prendre des décisions.

2.2 Modélisation des décisions

La modélisation des décisions est une approche clé dans le domaine de l'aide à la décision. Elle vise à formaliser et structurer le processus de prise de décision en utilisant des modèles et des outils appropriés. Les résultats de ces modèles peuvent être utilisés pour éclairer la prise de décision, en fournissant des informations quantitatives et qualitatives sur les conséquences probables de chaque choix. La modélisation des décisions intègre également la théorie de la décision (Car, 2018; Knowling et al., 2021). Cette approche prend en compte les contraintes opérationnelles spécifiques à chaque contexte, ainsi que les attentes des parties prenantes. Elle permet de définir des scénarios précis en fonction des objectifs à atteindre tout en prenant en considération des facteurs tels que les coûts, les ressources disponibles, et les résultats attendus.

Dans plusieurs domaines, la modélisation des décisions joue un rôle clé pour fournir des recommandations précises et adaptées. Par exemple, dans le domaine de l'irrigation, plusieurs éléments sont à considérer. Tout d'abord, il est crucial de prendre en compte les connaissances scientifiques liées à la croissance des plantes, aux besoins en eau des plantes, à la disponibilité en eau, et aux conditions environnementales. Ces connaissances sont formalisées à l'aide de modèles agronomiques.

Un aspect fondamental de la modélisation des décisions est la considération des incertitudes. Dans de nombreux cas, l'avenir est imprévisible, et les décideurs doivent composer avec un degré d'incertitude. Les modèles de décision intègrent souvent des scénarios multiples pour prendre en compte cette incertitude, permettant ainsi d'identifier des stratégies robustes qui fonctionnent bien dans diverses conditions. Un autre aspect important est la prise en compte des préférences des décideurs. Chaque décideur peut avoir des préférences différentes en ce qui concerne les résultats souhaités. Les modèles de décision tiennent compte de ces préférences en utilisant des fonctions d'utilité ou d'autres mécanismes pour quantifier les préférences individuelles et les intégrer dans le processus de prise de décision.

Pléthore d'approches existent pour modéliser la décision et élaborer des règles de décision à partir des modèles de systèmes complexes telles que :

- Les techniques d'apprentissages automatiques pour modéliser des relations complexes entre les données d'entrée et les décisions de sortie (comme les arbres de décisions, les réseaux bayésiens et les réseaux de neurones) (Gao et al., 2023);
- L'analyse multicritère (MCA) permettant de prendre en compte plusieurs critères ou objectifs dans le processus de décision (Roy, 2016) ;
- Les systèmes experts utilisant des bases de connaissances pour imiter le raisonnement humain et fournir des recommandations ou des décisions dans des domaines spécifiques (Santos-Gomez & Darnell, 1992),
- La notation de modèle de décision (DMN) permettant de représenter la "logique" appliquée lors de la prise de décision, ainsi que les processus et les éléments associés aux décisions (Car, 2018).

2.3 Ontologies pour la formalisation des connaissances

2.3.1 Définition d'une ontologie

La notion « ontologie » est d'abord d'origine philosophique remontant depuis ARISTOTE. Elle se consacre à l'étude de l'être, de l'existence et de la réalité en général. En informatique et en science de l'information, elle est définie par Gruber (1993) comme “une spécification explicite d'une conceptualisation d'un domaine”. Cette notion est ensuite raffinée par Stuber (1998) comme une “spécification formelle et explicite d'une conceptualisation partagée”. Autrement dit, elle permet, d'une part, d'identifier les concepts pertinents d'un champ thématique s'intéressant à un phénomène réel, et d'autre part, elle définit clairement la signification de ces concepts pour une utilisation dans un processus de modélisation-simulation. Une ontologie permet de décrire une connaissance avec une terminologie qui fait consensus dans un groupe (Michael et al, 2006).

2.3.2 Intérêts de l'ontologie

L'utilisation des ontologies offre de nombreux avantages dans divers domaines (Dieng-Kuntz et al., 2006). Tout d'abord, elles permettent d'établir un vocabulaire commun, harmonisant ainsi les termes utilisés dans un domaine particulier (Wei et al., 2020). Cela facilite la communication entre les parties prenantes et élimine les ambiguïtés linguistiques. De plus, les ontologies structurent les concepts en créant une hiérarchie, ce qui rend la gestion des données plus claire et cohérente (Du et al., 2023). Elles fournissent une base solide pour la représentation formelle des connaissances (Hitzler, 2021), ce qui contribue à une meilleure compréhension du domaine. Un autre avantage majeur des ontologies est leur capacité à

favoriser l'interopérabilité entre des systèmes d'information hétérogènes (Bittner et al., 2005). En définissant clairement les concepts et leurs relations, les ontologies permettent une communication fluide entre ces systèmes, même s'ils utilisent des langages ou des formats différents.

2.3.3 Utilisation des ontologies

L'ontologie se consacre à la formalisation des connaissances dans un domaine donné. Cette formalisation s'effectue en décrivant ses caractéristiques qui sont les concepts, les classes, les propriétés et les relations et qui existent au sein de ce domaine. Les ontologies sont utilisées pour représenter la connaissance de manière structurée et sémantique, ce qui les rend essentielles dans de nombreux domaines.

L'utilisation d'ontologies pour faciliter la compréhension des décisions prises par les modèles d'apprentissage automatique est une approche largement applicable, trouvant des applications diverses dans plusieurs domaines tels que l'agronomie comme AGROVOC (FAO, 2022) et le domaine médical (Dieng-Kuntz et al., 2006). Dans le domaine de l'agronomie, par exemple, une ontologie peut être construite pour formaliser et contextualiser les décisions relatives à la gestion des cultures. Tout d'abord, il serait essentiel d'établir un vocabulaire commun qui permettrait d'organiser et d'harmoniser les concepts liés à l'agriculture, tout en garantissant la compréhension commune entre les agriculteurs, les chercheurs et les professionnels du domaine. Cette ontologie pourrait identifier des concepts tels que les types de sols, les méthodes d'irrigation, les cycles de croissance des plantes, et les facteurs environnementaux qui influencent les récoltes. En utilisant des techniques d'analyse de texte, on pourrait extraire ces concepts à partir de sources variées telles que des manuels agricoles, des études de terrain et des données météorologiques.

Dans le domaine médical, les ontologies peuvent jouer un rôle crucial dans la compréhension et la prise de décision (Gérazine et al., 2018; Potier et al., 2023). Par exemple, une ontologie pourrait être développée pour contextualiser les résultats d'analyses médicales. Cette ontologie permettrait de définir de manière précise les concepts liés à la santé, tels que les symptômes, les maladies, les traitements et les interactions médicamenteuses. Elle pourrait être construite en s'appuyant sur des sources variées telles que des articles médicaux, des dossiers de patients et des bases de données de médicaments. Une telle ontologie aiderait les professionnels de la santé à interpréter les données médicales de manière cohérente et à prendre des décisions éclairées concernant les diagnostics et les traitements.

Il est important de noter que la construction d'une ontologie est étroitement liée à une méthodologie spécifique, à des outils de construction dédiés, et à un langage de représentation d'ontologie. Ces éléments constituent l'infrastructure nécessaire pour développer une ontologie robuste et fonctionnelle, quelle que soit l'application spécifique, qu'il s'agisse de l'irrigation des végétaux en ville, de l'agriculture, de la médecine, ou d'autres domaines.

2.3.4 Intégration de l'ontologie dans un système d'aide à la décision

L'intégration de l'ontologie dans un outil d'aide à la décision (OAD) présente de nombreux avantages. Elle permet de créer une structure sémantique robuste pour représenter les éléments du système, facilitant ainsi la compréhension du domaine. L'utilisation de l'ontologie peut s'étendre sur l'ensemble du processus de prise de décision, depuis la phase de conception initiale de l'outil jusqu'à son utilisation quotidienne. Cette approche joue un rôle fondamental dans la formalisation des connaissances et des concepts, ce qui a pour effet de rendre le processus de prise de décision plus transparent et plus efficace, comme le soulignent Kornyshova et Deneckère (2010). L'ontologie fournit une base solide pour décrire les différents scénarios envisagés, et elle peut être formalisée à l'aide du langage OWL (Web Ontology Language) (Lohmann et al., 2015).

Il est important de noter que la création d'une ontologie peut prendre deux voies : soit une nouvelle ontologie peut être construite pour répondre aux besoins spécifiques de l'OAD (Amarger et al., 2014), soit des ontologies existantes peuvent être utilisées et adaptées, comme le suggèrent Nguyen et al (2020). Cette flexibilité permet une meilleure intégration des connaissances et des concepts dans l'outil d'aide à la décision, renforçant ainsi sa capacité à fournir des recommandations précises et adaptées.

2.4 Illustration de la modélisation pour l'aide à la décision : estimation des besoins en eau des végétaux en ville

L'aide à la décision à l'irrigation des végétaux en ville est important pour assurer une gestion efficace et durable des espaces verts urbains (Rambhia et al., 2023). En milieu urbain, l'irrigation des végétaux est essentielle pour maintenir leur santé et les services fournis, tout en optimisant l'utilisation de l'eau et en minimisant les impacts environnementaux. L'approche de la modélisation à l'aide à la décision à l'irrigation des végétaux en ville repose, une partie, sur l'utilisation de modèles et de données pour estimer les besoins en eau des végétaux en fonction des facteurs environnementaux et des caractéristiques spécifiques à chaque site (Litvak et al., 2017; Hartin et al., 2018; Cheng et al., 2023). Ces modèles peuvent être de nature mécaniste,

en se basant sur des connaissances scientifiques, sur les processus biologiques et physiologiques des plantes, ou de nature statistique, en utilisant des algorithmes pour apprendre à partir de données passées et prédire les besoins en eau futurs.

L'estimation des besoins en eau des végétaux est une problématique complexe, en particulier dans les espaces verts en milieu urbain (Nouri et al., 2013). L'évapotranspiration (ET), qui regroupe l'évaporation et la transpiration des plantes, est primordiale pour estimer les besoins en eau des végétaux (Stanhill, 2005). Différents modèles d'évapotranspiration, de coefficients d'évapotranspiration des cultures et de mesures associées d'évapotranspiration (ET) sont rapportés dans la littérature et utilisés pour développer, calibrer et tester d'importants modèles de processus ET (Allen et al., 2011) et peuvent être divisés en deux catégories générales de méthodes ponctuelles (comprenant directes et indirectes) et de grandes échelles (Figure 3. 3). Cependant, la plupart d'entre eux sont adaptés aux environnements agricoles (Abbasi et al., 2021; Wanniarachchi & Sarukkalige, 2022), négligeant les particularités des paysages urbains.

En effet, les espaces verts urbains présentent une grande variabilité en termes de conditions édaphiques et climatiques, de types de végétation, densités et superficies, ce qui complique la mesure précise de l'ET (Litvak et al., 2017; Allen et al., 2020; Saher et al., 2021). Dans le contexte des espaces verts urbains, l'irrigation vise à maintenir une croissance saine et une apparence optimale des plantes. La stratégie d'irrigation peut également améliorer la résistance des plantes, la densité du feuillage, la couleur du feuillage et la croissance racinaire. Cependant, pour une gestion efficace de l'eau, il est essentiel d'estimer avec précision l'ET dans ces environnements afin d'optimiser les apports en eau (Cheng et al., 2023).

Les méthodes d'estimation de l'ET pour les infrastructures vertes en milieu urbain, telles que les arbres, les arbustes, les pelouses etc., sont encore peu développées et nécessitent une adaptation des méthodes existantes (Nouri et al., 2016). Il est donc crucial de développer des méthodes pratiques pour estimer l'ET dans les paysages urbains afin de mieux gérer l'irrigation des espaces verts et de promouvoir une utilisation responsable de l'eau. Cela permettra de préserver la santé des espaces verts en ville et améliorer les services écosystémiques fournis tout en conservant les ressources en eau de manière durable.

Ainsi, les méthodes de mesure des besoins en eau doivent être adaptées aux particularités des paysages urbains afin de mieux répondre aux besoins spécifiques des végétaux en ville. La détermination des besoins en eau des végétaux en milieu urbain peut être réalisée en utilisant différentes méthodes (Nouri et al., 2016). Trois approches couramment utilisées pour évaluer

les besoins en eau des végétaux en ville sont l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETr) par des modèles empiriques, l'utilisation des techniques de télédétection pour évaluer ETr et la mesure de la disponibilité de l'eau dans le sol directement par des capteurs.

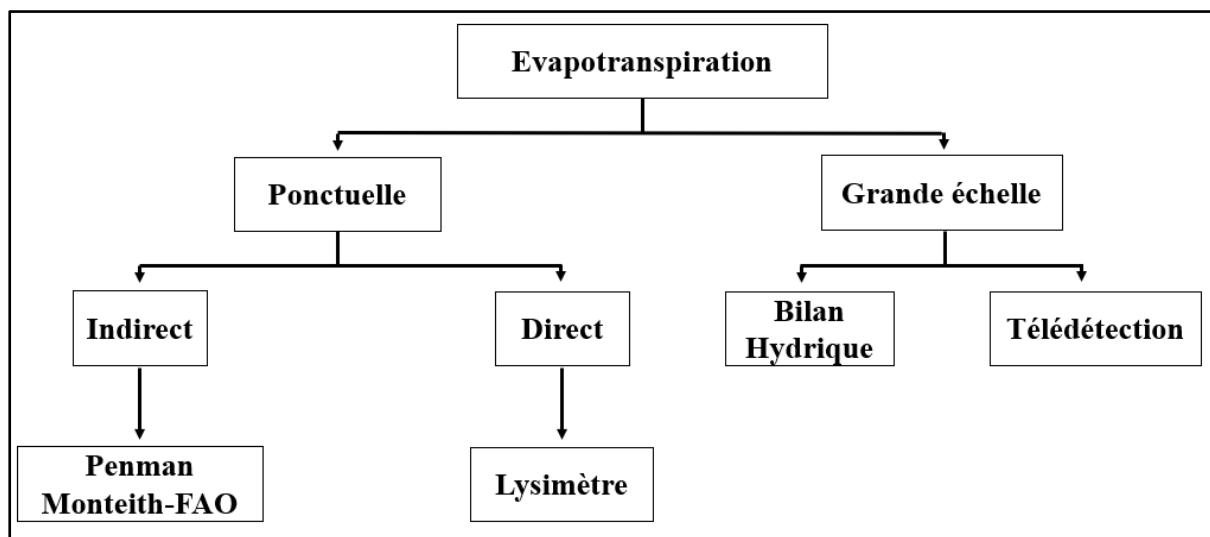


Figure 3. 3 : Illustration des différentes méthodes de déterminations de l'évapotranspiration

2.4.1 Détermination de l'évapotranspiration réelle (ETr)

L'évapotranspiration est le processus par lequel l'eau est évaporée à la fois du sol et des parties aériennes des plantes, y compris les feuilles et les tiges (Stanhill, 2005). Cette méthode est basée sur la mesure directe de l'eau perdue par évaporation et transpiration des végétaux. Différentes techniques sont utilisées pour mesurer l'évapotranspiration, notamment à l'aide des stations météorologiques, les bilans hydriques, les lysimètre etc...

La méthode Penman-Monteith est l'une des approches utilisées pour estimer l'évapotranspiration d'une culture (Penman, 1948). Elle est largement reconnue et recommandée par la FAO comme l'une des méthodes les plus précises pour calculer l'évapotranspiration réelle (ETr) en prenant en compte plusieurs facteurs météorologiques (Allen et al., 1998). La méthode Penman-Monteith permet de déterminer l'évaporation de référence (ET_0) avec un coefficient de culture (Kc) pour estimer l'évapotranspiration réelle (ETr) pour une culture spécifique (Allen et al., 1998).

Le coefficient de culture (Kc) est utilisé pour ajuster l'évapotranspiration réelle en fonction des caractéristiques spécifiques de la culture, telles que le type de culture, son stade de développement, la densité de la canopée et les conditions environnementales locales. Il est généralement déterminé expérimentalement (Irmak, 2008).

Pour l' ET_0 , c'est la quantité maximale d'eau qui pourrait s'évaporer si la surface était entièrement couverte par une culture homogène (ex : gazon) avec un approvisionnement illimité en eau. Elle est principalement influencée par les conditions météorologiques telles que la température, l'humidité de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement solaire (Maqsood et al., 2022) et peut être calculée à l'aide de l'équation de Penman-Monteith :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta Rn + \gamma \frac{900}{T+273} U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

$$ET_r = ET_0 * Kc$$

Avec :

ET_r : évapotranspiration réelle

Kc : coefficient cultural

ET_0 : évapotranspiration de référence journalière (mm/j)

Rn : Rayonnement net (10^6 Joules/m²)

T : Température moyenne journalière (°C)

U_2 : Vitesse moyenne journalière du vent mesuré à 2 mètres (m/s)

e_a : Pression de vapeur d'eau à la saturation à la température T (kPa)

e_d : Pression de vapeur moyenne journalière (kPa)

Δ : Pente de la courbe de pression saturante à la température T (kPa/°C)

γ : Constante psychrométrique (kPa/°C)

Une fois que l'ET réelle est estimée, les gestionnaires peuvent programmer l'irrigation en fonction des besoins des plantes. Ils peuvent ajuster la fréquence et la durée de l'irrigation en fonction des conditions météorologiques actuelles et des besoins spécifiques des végétaux. Il est important de noter que la méthode de Penman-Monteith est complexe et nécessite des données météorologiques précises ainsi que des ajustements pour prendre en compte les différentes espèces végétales présentes dans l'espace vert d'autant plus que le (Kc) est spécifique à chaque culture et est expérimenté davantage pour les cultures agricoles.

L'évapotranspiration peut être déterminée aussi à partir du calcul du bilan hydrique. C'est une méthode indirecte permettant de déterminer l'évapotranspiration en mesurant les changements dans le contenu en eau du sol sur une période donnée. Cette approche, bien qu'ancienne, présente des inconvénients tels que des erreurs liées à l'uniformité de l'irrigation, à la variabilité spatiale des propriétés du sol et des conditions d'humidité, ainsi qu'à la négligence de la percolation profonde ou de l'ascension capillaire (Nouri et al., 2013).

Concernant les lysimètres, ce sont des conteneurs remplis de sol, qui permettent une mesure directe de l'évapotranspiration (Anapalli et al., 2016). Cependant, ils sont sensibles à différents facteurs environnementaux, tels que la hauteur de végétation, et ne sont pas pratiques pour des conditions de végétation mixte ou des espacements importants entre les plantes. Leur utilisation est donc limitée en milieu urbain (Nouri et al., 2013).

Des approches alternatives plus simples, telles que le modèle WUCOLS, peuvent également être utilisées pour estimer les besoins en eau des espaces verts urbains. La méthode WUCOLS a été conçue pour aider à la gestion de l'eau dans les espaces verts urbains en Californie, aux États-Unis par Costello et al. (2000). Elle a été utilisée dans plusieurs études en irrigation des végétaux en ville (Parés-Franzi et al., 2006; Salvador et al., 2011; Hof & Wolf, 2014; Nouri et al., 2016; Padullés Cubino et al., 2017; Hartin et al., 2018; Sojoodi & Mirzaei, 2019; Shojaei et al., 2020; Cheng et al., 2023). En utilisant l'approche WUCOLS, l'évapotranspiration du paysage (ET_L) est calculée comme indiqué dans l'équation suivante :

$$ET_L = ET_0 * K_L = ET_0 * K_{mc} * K_s * K_d$$

Où

ET_0 : représente l'évapotranspiration de référence

(K_L) : coefficient paysager représente le produit des trois facteurs (la densité (K_d), l'espèce (K_s) et le microclimat (K_{mc}))

En effet, WUCOLS (Water Use Classification of Landscape Plants) (Costello et al., 2000) est une méthode développée pour estimer les besoins en eau des plantes en milieu urbain. Cette méthode vise à déterminer le coefficient de paysage (K_L) pour différentes espèces végétales en milieu urbain, afin d'estimer leur évapotranspiration (ET_L). Contrairement aux cultures agricoles ou aux pelouses, les végétaux en milieu urbain peuvent être un mélange d'espèces d'arbres, d'arbustes et de gazons, ce qui rend difficile la détermination des besoins en eau. Le WUCOLS attribue des valeurs numériques à trois facteurs principaux influençant

l'évapotranspiration des végétaux en milieu urbain : les facteurs de culture, les aspects environnementaux et les pratiques de gestion. La méthode combine ces facteurs pour obtenir le coefficient de paysage (K_L), qui est ensuite utilisé avec la référence d'évapotranspiration (ET_0) pour estimer l'évapotranspiration des plantes en milieu urbain (ET_L).

Le facteur de culture (K_s) prend en compte les différences dans les besoins en eau des différentes espèces de plantes. Costello et Jones (2014) ont classé environ 3 500 espèces en Californie en quatre groupes en fonction de leurs besoins en eau : élevé (70 à 90% ET_0), modéré (40 à 60% ET_0), faible (10 à 30% ET_0) et très faible (<10% ET_0). Le facteur de densité (K_d) concerne la densité de végétation, mesurée par la surface foliaire collective et ses pertes spécifiques d'eau. Différentes densités de végétation ont un effet significatif sur le taux d'évapotranspiration et la perte d'eau. Le facteur de microclimat (K_{mc}) prend en compte l'effet des conditions environnementales spécifiques sur la perte d'eau des plantes en milieu urbain. Ces conditions, telles que la température, la vitesse et la direction du vent, et l'humidité, peuvent être influencées par les bâtiments et les surfaces pavées dans l'environnement urbain.

2.4.2 Evapotranspiration réelle par télédétection

L'utilisation de la télédétection pour estimer l'évapotranspiration (ET) est un moyen crucial en raison de sa capacité à fournir des informations spatiales sur la végétation et les conditions environnementales à grande échelle (Shanker Srivastava & Patel, 2022), d'autant plus que la densité des feuilles représente près de 80% de l'évapotranspiration (Dalmago et al., 2004). Les variations spatiales des coefficients de végétation dans différentes positions d'échantillonnage résultent des espèces disponibles, de leur niveau de maturité, de la couverture de leur canopée et également de la présence de caractéristiques spécifiques des paysages urbains, telles que les bâtiments ou les revêtements de sol (K. Wang & Dickinson, 2012). Ces éléments rendent difficile la mesure des facteurs de végétation depuis la surface du sol (Nouri et al., 2013). La télédétection permet de contourner cette difficulté en fournissant une vue aérienne de la végétation (Chen & Liu, 2020).

Il existe différentes approches de télédétection pour estimer l'ET, notamment les méthodes directes empiriques, les méthodes résiduelles et les méthodes indirectes (Tsouni et al., 2008). Les approches basées sur l'énergie évaluent les bilans énergétiques à l'aide de modèles tels que METRIC et SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2007), généralement couplés à des mesures sur le terrain pour l'étalonnage. Les approches basées sur les indices de végétation utilisent simplement des indices de végétation pour estimer les coefficients de culture en raison

de la relation étroite entre l'indice de végétation (NDVI) et la transpiration (Boegh et al., 2009; Drisya et al., 2018).

La télédétection a été reconnue comme un outil efficace pour récupérer des informations réparties dans de vastes zones de végétation mixte à l'échelle de la parcelle et à l'échelle régionale sur le développement des végétaux et leurs besoins en eau, en s'appuyant sur la disponibilité croissante d'observations satellitaires à haute résolution spatiale et temporelle (Brown & Pervez, 2014; McAllister et al., 2015; Hamze et al., 2023). Elle permet d'estimer des paramètres tels que le flux de chaleur de surface, la fraction d'évaporation, l'indice de végétation et les variations diurnes de la température de surface à l'aide de techniques de télédétection (Chen & Liu, 2020). La télédétection est plus économique que les mesures ponctuelles, avec une résolution spatiale plus élevée et une applicabilité dans des environnements variables.

Cependant, l'utilisation de la télédétection présente des inconvénients, tels que le temps entre les captures satellites, le coût élevé des images à haute résolution et les erreurs dans les zones de végétation étroites. Pour améliorer la précision, la combinaison de la télédétection avec des mesures in-situ des bilans énergétiques est recommandée.

2.4.3 Détermination des besoins en eau des végétaux par des capteurs

L'utilisation de capteurs d'humidité du sol pour mesurer les besoins en eau des plantes constitue une avancée technologique majeure qui permet une approche scientifique et ciblée de l'irrigation (J.-Y. Guo et al., 2022; Pahuja, 2022). Ces capteurs sont souvent installés à différentes profondeurs dans le sol, permettant ainsi une surveillance précise des conditions hydriques (Haddon et al., 2023). Les données recueillies sont utilisées pour déterminer le moment et la quantité appropriés d'irrigation, ce qui permet de maximiser l'utilisation de l'eau tout en évitant le gaspillage (Hamze et al., 2023).

En effet, la teneur en eau du sol (Figure 3. 4) désignant la quantité d'eau présente dans les espaces vides du sol, est un paramètre important dans la gestion de l'eau d'irrigation en agriculture et en espace vert. Plusieurs facteurs influencent la teneur en eau du sol, tels que, le type de sol, la texture, la structure, la profondeur, la pente etc. Les sols sableux ont tendance à avoir une capacité de rétention d'eau plus faible par rapport aux sols argileux. De plus, la compaction du sol peut réduire la porosité et donc la capacité de rétention d'eau. La végétation, le climat et les pratiques agricoles jouent également un rôle dans la variation de la teneur en

eau du sol. Mesurer cette teneur en eau revêt une importance cruciale pour comprendre les besoins hydriques des plantes et la disponibilité de l'eau dans l'environnement du sol.

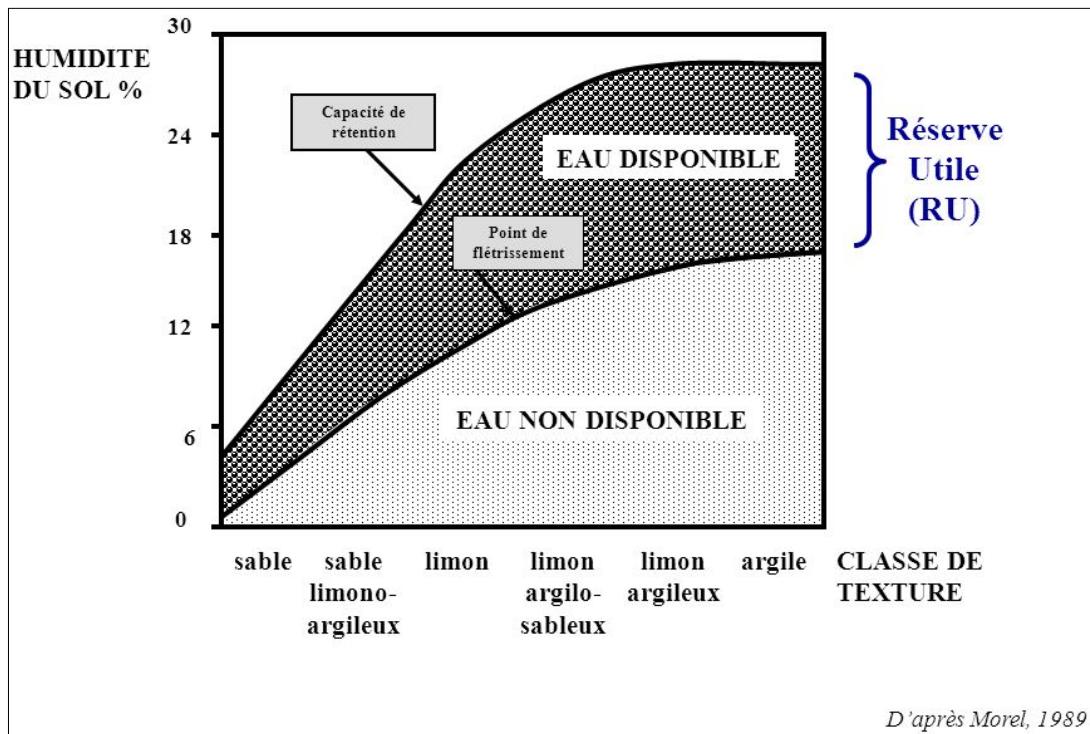


Figure 3. 4 : Réserve en eau du sol et la variation de la capacité de rétention d'eau et du point de flétrissement (Réserve Utile) en fonction de la texture du sol.

La teneur en eau du sol peut être mesurée à l'aide de méthodes de contact direct ou indirect (Jackson et al., 2008; S. Patil et al., 2017). Les méthodes directes sont des approches standard qui permettent une mesure précise de l'humidité du sol en termes de teneur en eau gravimétrique (TEG) ou de teneur en eau volumétrique (TEV), en se basant sur des mesures primaires de masse ou de volume grâce à des procédures de séchage en étuve et de pesée. La teneur en eau gravimétrique représente le rapport de la masse d'eau, c'est-à-dire la différence entre la masse du sol humide et celle du sol sec (Sharma, 2018). De manière similaire, la teneur en eau volumétrique est le rapport entre le volume d'eau retenu et le volume total du sol à un moment donné, par exemple, une teneur en eau volumétrique de 20% signifie que 20% du volume du sol est occupé par de l'eau (Bogena et al., 2007; Sharma, 2018).

Les techniques de mesure indirecte de l'humidité du sol analysent les variations relatives des paramètres d'un capteur en réponse aux changements d'humidité du sol. De nombreux capteurs ont été développés par des scientifiques et des ingénieurs afin de surveiller la dynamique de l'humidité du sol (Paramasivam et al., 2000; Bittelli, 2011; Adla et al., 2020; Yu et al., 2021; Haddon et al., 2023). Il s'agit des sondes résistives, des capteurs diélectriques capacitifs (Adla

et al., 2020), des réflectomètres capacitifs en domaine temporel (TDR) (Abdullah et al., 2018) et en domaine fréquentiel (FDR) (Zhu et al., 2019), des sondes à neutrons (ISBERIE, 1992; Fityus et al., 2011), des capteurs de potentiel de matrice de sol ou sondes tensiométriques (Irmak et al., 2006; Tron, Isbérie, et al., 2013) etc.

En agriculture et en espace vert, les capteurs tensiométriques et capacitifs se distinguent comme des méthodes opérationnelles largement utilisées. Ces deux types de capteurs offrent des avantages spécifiques qui en font des choix privilégiés pour de nombreuses applications. Les capteurs capacitifs mesurent l'humidité du sol en se basant sur les propriétés électriques du sol. Ils utilisent le principe que la capacité électrique du sol varie en fonction de la teneur en eau. Les capteurs capacitifs émettent un signal électrique dans le sol et mesurent la réponse électrique du sol pour déterminer la teneur en eau (Adla et al., 2020). Ces capteurs sont appréciés pour leur facilité d'installation, leur grande précision. Ils sont également adaptés à la surveillance à long terme de la teneur en eau dans divers types de sols et d'environnements.

Les capteurs de potentiel de matrice de sol appelés aussi sondes tensiométriques mesurent la teneur en eau du sol en se basant sur le potentiel matriciel (Paramasivam et al., 2000). Ils sont particulièrement adaptés pour évaluer le potentiel de l'eau dans le sol et son aptitude à être extraite par les plantes. Le potentiel matriciel représente l'énergie nécessaire pour extraire l'eau du sol et est influencé par les forces d'adhérence entre l'eau et les particules du sol (Tron, Isbérie, et al., 2013). Ces capteurs se composent d'une résistance de céramique poreuse et d'un câble en acier inoxydable(Irmak et al., 2014). La résistance en céramique est remplie de matériau sensible à l'humidité. Lorsque la teneur en eau du sol change, la résistance électrique de la céramique change également. Le câble en acier inoxydable est utilisé pour mesurer cette résistance électrique et convertir cette mesure en un potentiel matriciel (Kirkham, 2023).

Il est important de noter que la création d'une ontologie peut prendre deux voies : soit une nouvelle ontologie peut être construite pour répondre aux besoins spécifiques de l'OAD (Amarger et al., 2014), soit des ontologies existantes peuvent être utilisées et adaptées, comme le suggèrent Nguyen et al (2020). Cette flexibilité permet une meilleure intégration des connaissances et des concepts dans l'outil d'aide à la décision, renforçant ainsi sa capacité à fournir des recommandations précises et adaptées à chaque situation.

Chapitre 4 : Modélisation de la dynamique racinaire : Proposition d'une méthode d'évaluation de la reprise des arbres urbains

Introduction

Les arbres urbains réalisent plusieurs fonctions et services écosystémiques bénéfiques à l'environnement comme la séquestration du carbone, la préservation des espaces face à l'érosion ou la protection des habitats face aux catastrophes naturelles (chapitre 1). Ils jouent aussi un rôle d'importance pour l'Homme, sa santé, par l'élimination des polluants atmosphériques, la purification de l'air, la réduction des îlots de chaleur, l'amélioration du développement cognitif (Escobedo et al., 2011; Nowak et al., 2014; Gillner et al., 2015; Livesley et al., 2016; Nowak et al., 2018; Ungaro et al., 2022; Drew-Smythe et al., 2023). Ils sont aujourd'hui considérés comme une alternative de premier plan pour s'adapter au dérèglement climatique dans nos villes (de Coninck et al., 2018). Les services fournis permettent d'atténuer les températures caniculaires, causées par les effets du changement climatique, grâce à l'ombrage et à la transpiration en fonction de la disponibilité d'eau dans le sol (Bowler et al., 2010; Armson et al., 2013; Rahman et al., 2017).

Cependant, cette contribution est mise en péril par des défis tels que la croissance restreinte, le déclin et la mortalité précoce des arbres en ville (Hale et al., 2015; Widney et al., 2016). En effet, ils sont souvent soumis à des conditions de croissance difficiles causées par un espace d'enracinement insuffisant, un compactage du sol, des sols inadaptés et des opérations de construction (Pauleit et al., 2002). Plusieurs facteurs peuvent contraindre la croissance et faciliter la mortalité des arbres urbains tels que le stress hydrique, une mauvaise gestion « post-transplantation », des facteurs biophysiques comme le climat et les conditions météorologiques extrêmes (Franklin et al., 1987; Brzostek et al., 2014; Locosselli et al., 2019; Hilbert et al., 2019; Esperon-Rodriguez et al., 2022).

En fin de compte, toute perte d'arbres nouvellement plantés représente un gaspillage de ressources, en termes financier, temps perdu lors des opérations de plantation et en utilisation de la ressource eau. Pour remédier à ce problème, un bon suivi des arbres après transplantation est primordial pour assurer la reprise (Wattenhofer & Johnson, 2021). Bien que sa définition ne soit pas parfaitement délimitée, le terme reprise est couramment utilisé pour décrire l'état d'un arbre après transplantation. Dans le domaine pratique, une reprise réussie est souvent exigée par les entrepreneurs et promis par les pépinières (Fascicule n°35 du CCTG - Les entreprises du paysage, 2021). De plus, des études scientifiques se sont penchées sur la comparaison des effets de diverses méthodes de production, de plantation et/ou de gestion sur

la capacité des arbres à reprendre leurs activités après transplantation de manière optimale (Struve & Joly, 1992; Beeson, 1994; Gilman et al., 2013).

Les premières années de la vie d'un arbre aussi appelées la période de reprise, est généralement définie comme la période de temps nécessaire à un arbre pour repousser son système racinaire et capable de supporter une croissance aérienne (Wattenhofer & Johnson, 2021). Autrement dit, la reprise est un processus biologique au cours duquel l'arbre transplanté s'ancre définitivement dans son nouvel environnement (Rietveld, 1989; Grossnickle, 2005; ATGER & GENOYER, 2017) et à partir duquel il pourra remplir les services écosystémiques attendus. En effet, les arbres nouvellement transplantés souffrent d'un « stress post-transplantation » caractérisé par une modification des fonctions physiologiques et une diminution de la croissance (Struve, 2009; G. Watson & Hewitt, 2020). Les racines qui naissent à partir de semis de graines (semés sur place) se développent naturellement en fonction des conditions du sol et d'autres paramètres (climat, espèces etc.), alors que les racines des arbres transplantés sont forcées de s'acclimater à leur nouvel environnement. Dans la plupart des cas de transplantations d'arbres en milieu urbain, il s'agit des arbres en provenance de la pépinière qui perdent plus de 70% de son système racinaire (Drénou et al., 2006) favorisant le « stress post-transplantation ».

D'après Atger et al (2017), la reprise peut être constatée par plusieurs manières, soit au niveau de la partie aérienne ou la partie souterraine. L'évolution de la dynamique de croissance de l'arbre de l'ensemble du houppier dans le temps a été le principal critère utilisé pour caractériser la performance de la reprise aérienne. Plusieurs indicateurs sur la partie aérienne de l'arbre ont permis d'évaluer la reprise à titre d'exemple l'évolution de la longueur des pousses ou des tiges, le grossissement du tronc, les dimensions du feuillage etc. (Struve & Joly, 1992; Radoglou & Raftoyannis, 2002; Harris et al., 2008; Pinto-Correia et al., 2011; Dostálek et al., 2014; Koeser et al., 2014; Woolery & Jacobs, 2014; Sherman et al., 2016). Toutes fois, la technique pour caractériser la reprise de l'arbre via la partie aérienne reste une évaluation visuelle contrôlée par des mesures directes et l'application de marqueurs morphologiques.

Contrairement à la partie aérienne, la partie souterraine, considéré comme une mystérieuse boîte noire (Drénou et al., 2006), constitue un obstacle majeur pour constater la reprise à partir d'une évaluation visuelle. Cependant, pour évaluer la reprise racinaire, il faut appliquer des méthodes partiellement destructrices en l'occurrence le diagnostic racinaire permettant de réaliser des profils de sol en creusant pour déterminer la performance d'occupation du sol par les racines à différents niveaux de profondeur et distances du tronc (ATGER & GENOYER,

2017). Il est aussi possible de procéder à une excavation racinaire pour une analyse détaillée de l'état de l'enracinement et observer la colonisation racinaire pour une meilleure évaluation de la reprise (BENSAOUD & Marié, 2000).

Dès lors, il existe pléthore d'études portant sur les différents aspects de la reprise des arbres plantés (G. W. Watson et al., 1986; Struve, 2009; Gilman et al., 2013; Puyal et al., 2022). Cependant, la plupart de ces études ne prennent pas en compte les arbres poussant dans des zones urbaines typiquement contraignantes mais plutôt dans des pépinières ou dans des conditions de culture bien déterminées (comme la forêt). Quelques études se sont intéressées récemment à l'évaluation de la reprise des arbres plantés dans de véritables sites urbains (Levinsson et al., 2015; Sherman et al., 2016; G. Watson & Hewitt, 2020; Schütt et al., 2022). Plusieurs facteurs liés au site (contexte pédologique, niveau d'urbanisation, obstacles souterrains, largeur des rues, volume du sol de l'arbre), à la méthode de production (parcours en pépinière (Koeser et al., 2014)), à l'irrigation (Montague et al., 2007; Rambhia et al., 2023) peuvent aussi influencer la survie et la croissance des arbres transplantés et par conséquent la reprise.

Parmi les études permettant d'évaluer la reprise des arbres après transplantation, certaines méthodes se reposent sur des paramètres individualisés ou combinés entre physiologiques et morphologiques par exemple la survie après transplantation, ou la croissance du végétal constatée, par exemple, au niveau des pousses, des feuilles, du tronc ou des tiges (Levinsson et al., 2015; Sherman et al., 2016; Wattenhofer & Johnson, 2021; Esperon-Rodriguez et al., 2023). Elle est aussi déterminée par des mesures de caractéristiques physiologiques tels que le potentiel hydrique de l'arbre (Beeson, 1994) au niveau des racines, du tronc ou des feuilles. Levinsson et al (2015) ont étudié la reprise des arbres urbains nouvellement plantés en se basant sur l'évaluation visuelle de leur vitalité. Ils analysent les facteurs influençant ces évaluations en lien avec les caractéristiques des feuilles et de la couronne. L'étude compare également ces évaluations avec l'état hydrique des arbres, mesuré par le potentiel hydrique des pousses. Esperon-Rodriguez et al (2023) quant à eux, ont récemment utilisé des méthodes d'inventaires quantifiant les taux d'échec d'une plantation afin d'évaluer la reprise des arbres urbains quelques temps après transplantations.

Des études de modélisations en utilisant des données existantes ont été faites pour évaluer la reprise, par exemple, Sherman et al (2016) ont mené une analyse sur dix années de données (force des arbres et des paramètres du site de plantation) de transplantation d'arbres urbains à

Boston, États-Unis, pour modéliser la période de reprise de trois espèces d'arbres couramment plantées en ville (Acer, platanes et Quercus). En utilisant une régression linéaire par morceaux, le "point de rupture" a été identifié, indiquant quand le diamètre de la tige commence à augmenter significativement après la transplantation. Les périodes de reprise variaient pour chaque espèce : 2,1 ans pour le quercus, 4,0 ans pour le platane et 5,9 ans pour l'acer. L'impact des facteurs de site sur le diamètre des troncs était variable. Cette étude est menée dans le but d'offrir aux gestionnaires de patrimoine arboré dans le nord des États-Unis un outil efficace à la gestion des arbres. Cependant, les données utilisées dans cette étude sont récoltées plusieurs années après la transplantation des arbres et qu'il n'y a pas de suivi individuel des arbres au fil du temps pour mesurer la croissance du diamètre de tige des arbres.

Durant cette période de la vie de l'arbre, l'eau est généralement considérée comme le facteur limitant à la croissance et à la reprise (Gilbertson et Bradshaw, 1985 ; Miller et Miller, 1991 ; Watson, 1996 ; Pallardy, 2008). Le stress hydrique du sol peut avoir un impact important sur la capacité d'un jeune arbre à développer des racines (Struve, 2009). Par exemple, dans une étude de Gilman et al. (1998), des mesures de potentiel hydrique ont été utilisées pour évaluer le succès de la reprise d'arbres exposés à différentes quantités d'irrigation. Toutefois, les conclusions sur le succès de la reprise ont été principalement basées sur la croissance de la tige. De même, une étude menée par Harris et Gilman (1993) s'est appuyée sur des évaluations physiologiques pour conclure sur le succès de la reprise des arbres. Une autre approche a été adoptée par Struve et al. (2000), qui ont considéré les arbres comme établis dès lors qu'ils ne présentaient aucun signe de stress hydrique, même en cas de légère sécheresse.

Par conséquent, les méthodes usuelles requièrent d'un suivi long de la croissance (sur plusieurs saisons). Elles donnent lieu à des résultats ponctuels et tardifs permettant de qualifier une reprise. Pour ces raisons, il s'avère nécessaire de développer une démarche proactive permettant de suivre en continu un arbre pour pouvoir évaluer et anticiper sa reprise au lieu de la constater, à postériori, après quelques années. L'utilisation d'outils de surveillance de l'eau du sol, peut offrir la possibilité de réaliser des prévisions anticipées quant à la reprise des arbres, éliminant ainsi la nécessité d'attendre plusieurs années après leur plantation pour évaluer leur succès. En effet, ces capteurs sont installés dans le sol à proximité des racines et mesurent en continu des informations précises sur la disponibilité en eau pour les arbres. Ils peuvent jouer un rôle crucial dans la détection de l'activité racinaire et ainsi fournir des informations importantes sur la reprise des arbres nouvellement transplantés.

Lorsqu'un arbre commence à s'implanter dans son nouvel environnement, il développe progressivement ses racines pour rechercher l'eau dans le sol. Cette activité racinaire a un impact sur le niveau d'humidité du sol autour de l'arbre et peut être mesurée instantanément par des outils de surveillance de l'eau. Ces outils fournissent des données qui peuvent faire l'objet d'un traitement et d'une analyse permettant de modéliser la dynamique racinaire des arbres. Au lieu d'attendre des années d'observations pour obtenir de résultats fiables, les avancées en matière de technologie et de collecte de données font émerger de nouvelles approches pour accélérer et améliorer ce processus.

Le suivi tensiométrique s'avère être un outil de pronostic fiable pour évaluer si l'arbre a repris sa croissance racinaire et in fine sa survie (Tron, Isbérie, et al., 2013). Cependant, à notre connaissance, il n'y a pas d'études significatives faisant le lien entre une activité racinaire (à fortiori la reprise de l'arbre) et une mesure tensiométrique. En effet, la plupart des récentes études utilisant ces outils même pour arbres urbains se sont orientées principalement sur la détermination des seuils critiques de disponibilité en eau du sol en fonction des paramètres du site de plantation et des variabilités météorologiques, par exemple (C. Zhang & Li, 2021; Schütt et al., 2022).

Dans le cadre de cette étude, nous développons une méthode originale permettant de qualifier l'activité racinaire des arbres à partir de mesures tensiométriques dans un premier temps, puis évaluer leur reprise tout en tenant compte de facteurs environnementaux. Afin de mener à bien cette étude, nous nous reposons sur une cohorte de plusieurs centaines d'arbres (localisés en zone urbaine) qui sont suivis pendant au moins trois ans au moyen des capteurs tensiométriques.

Les objectifs de cette étude sont de :

- Concevoir un modèle permettant, à partir des données tensiométriques récoltées, de comprendre et de prédire le comportement des racines de l'arbre afin d'anticiper sur la reprise durant les trois années consécutives suivant la transplantation ;
- Contribuer à l'outil d'aide à la décision à l'irrigation déficitaire des arbres urbains développé dans le cadre de cette étude.

1 Données utilisées dans cette étude

1.1 Matériel végétal et zones d'études

Dans cette étude, une cohorte d'arbres a été utilisée, ils ont été transplantés puis suivis pendant 3 ans (entre 2016 et 2022) dans plusieurs villes de France. Ces données sont issues de l'exploitation des bases de données de l'entreprise Urbasense dans le cadre de cette thèse Cifre. En effet, l'entreprise travaille avec les collectivités locales, en France, qui sont souvent responsables de la gestion et de l'entretien des parcs, jardins, et autres espaces verts urbains. Lorsqu'une nouvelle plantation d'arbres est réalisée, Urbasense peut les proposer ses services pour le suivi des arbres nouvellement transplantés. Ce sont les données issues de ces suivis que nous utilisons dans le cadre de cette étude.

Le matériel végétal est composé de 3609 arbres d'une force (diamètre tronc) comprises entre 20 et 35 cm (lors de la transplantation), appartenant à 85 genres et 263 espèces (voir extrait dans Tableau 4. 1). Les genres les plus représentés (Figure 4. 1) sont : Quercus (590 sujets), les Acer (389 sujets), les Pinus (264 sujets), les Prunus (247 sujets), les Tilias (231 sujets), les Platanus (206 sujets). La région parisienne (Île de France) compte plus d'arbres suivie des régions Provence-Alpes-Côte d'Azur et Auvergnes-Rhône-Alpes référencent.

Tableau 4. 1 : Extrait des genres les plus représentatifs classé par région

Région	ABI	ACE	ALN	CAR	PIN	CEL	FRA	GLE	LIQ	MAG	PLA	PRU	PYR	QUE	SOP	TIL	ULM	ZEL	Total Par Région
Ile-de-France	8	165	59	50	129	43	48	71	46	27	158	162	35	282	19	123	59	44	1528
Bourgogne-Franche-Comté	3	22	5	4	7	2	1	2	3	0	3	10	4	22	8	8	2	1	107
Pays-de-la-Loire	2	46	0	6	0	3	6	1	2	10	7	10	1	46	5	10	5	5	165
Auvergnes-Rhônes-Alpes	2	40	10	4	9	3	4	11	3	10	3	11	7	39	4	9	9	13	191
Centre-Val de Loire	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	10	0	5	0	0	20
Normandie	0	7	0	0	2	1	0	1	1	0	0	6	0	2	0	2	0	0	22
Hauts-de-France	0	11	8	4	19	2	3	7	12	15	10	10	5	26	6	18	5	3	164
Grand Est	0	14	3	2	15	7	2	1	7	3	3	15	0	20	5	14	5	6	122
Bretagne	0	1	1	0	1	0	2	0	1	0	0	1	0	8	0	8	0	0	23
Nouvelle-Aquitaine	0	6	3	2	3	4	1	1	0	1	4	5	0	6	2	3	3	0	44
Occitanie	0	37	3	10	30	16	18	3	1	15	9	13	1	83	5	16	4	3	267
Provence-Alpes-Côte d'Azur	0	38	3	0	49	28	8	0	3	2	8	4	5	46	4	15	2	3	218
Total par Genre	15	389	95	84	264	109	93	98	79	83	206	247	58	590	58	231	94	78	

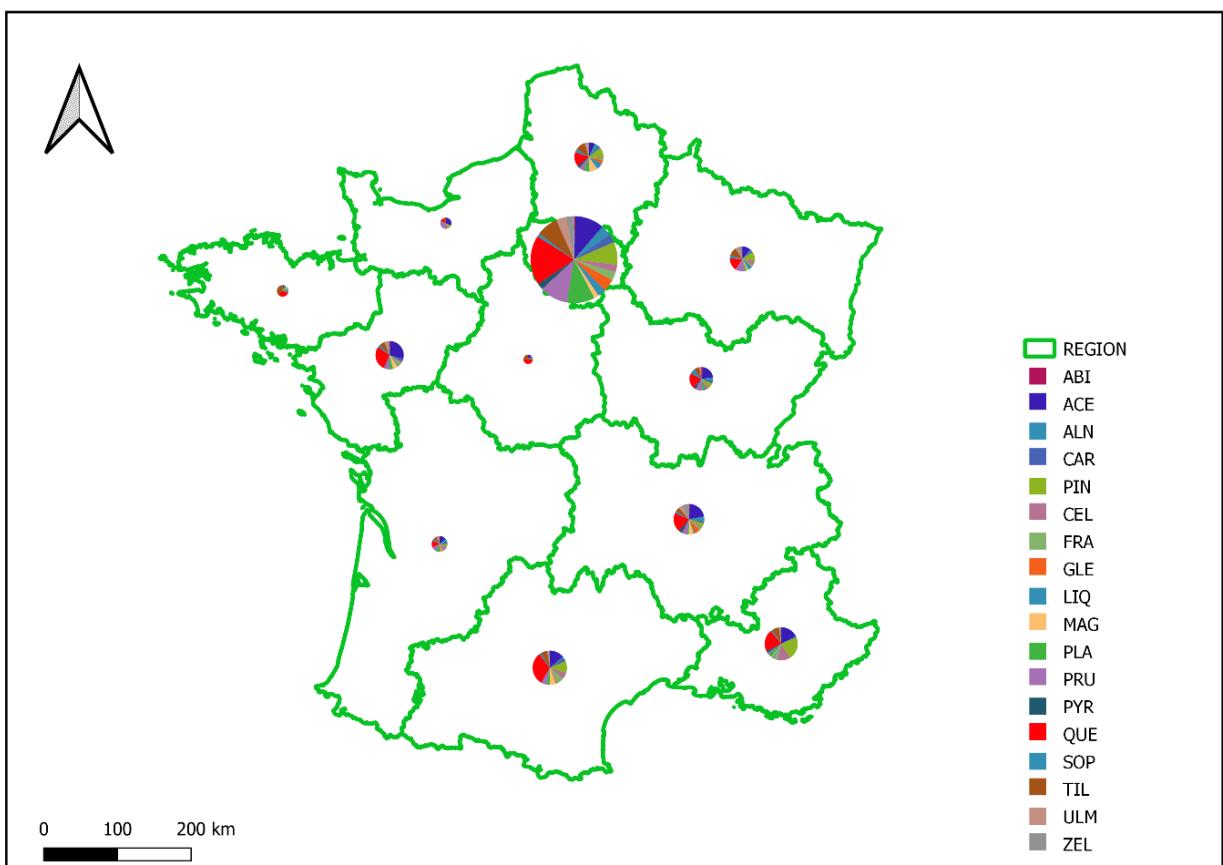


Figure 4. 1 : Répartition des arbres suivis par région et par genre ; les genres représentés dans cette figure représentent les espèces les plus suivies par région. Les arbres suivis sont plus majoritairement présents en région parisienne. Le nom des genres sont abrégés à leurs trois premières lettres, par exemple Quercus = QUE et Platane = PLA.

1.2 Facteurs influençant la reprise (site, végétal, sol et climat)

Les arbres urbains vivent dans un environnement très différents de leur milieu naturel, ce qui fait que plusieurs facteurs perturbent leur fonctionnement. Une variabilité importante est notée notamment en ce qui concerne le site, l'espèce, le sol, le climat, le système de gestion etc.

Les arbres sont plantés dans des jardins, parcs, isolés ou en alignement ou transplantés dans des fosses unitaires ou collectives à talus continu, en pleine terre ou dans des mélanges terre-pierre. Les espaces entourant les fosses de plantation sont parfois anthroposés (parking, chaussée, trottoir minéralisé, pavés, pelouse, couvre-sol, talus). Nous avons remarqué au

Nous avons regroupé les arbres dans les régions climatiques selon la typologie de climat mise en évidence par Joly et al (2010), pour pouvoir faciliter les analyses sur les différences de reprise entre les arbres urbains des différentes régions climatiques. Les informations

taxonomiques (genre, espèce(essences)) de chaque arbre sont renseignées dans les bases de données nous permettant de les classer et étudier les comportements en fonction de leur classe.

Nous avons déterminé pour chaque arbre l'espèce, la région climatique dans laquelle se trouve l'arbre et la texture de la motte. La catégorie mélange terre pierre du sol de la fosse de plantation n'a pas été relevée du fait des contraintes opérationnelles des sols urbains qui sont souvent remaniés, constitués d'un mélange hétérogène et compacts et par conséquent très difficiles à caractériser et à classer.

1.3 Dispositif de mesure de la disponibilité de l'eau dans le sol :

Généralement, les arbres urbains sont transplantés pendant la période de l'automne (octobre /novembre) qui est particulièrement favorable à la reprise (Drénou et al., 2006). Dans le cas de cette étude, les périodes de transplantations constatées s'étalent d'octobre au mai de l'année suivante pour 95% des sujets. L'installation du dispositif est faite entre la transplantation et le débourrement. Quel que soit le mois de transplantation de l'arbre la première année de suivi (végétation) est celle du premier été suivant la plantation. Par exemple, des arbres transplantés du mois de novembre 2017 au mai 2018, l'année 2018 sera considérée comme première année de suivi et comme année de plantation.

Le dispositif est composé d'outils pour mesurer la tension de l'eau dans le sol des arbres urbains nouvellement transplantés. Les outils sont constitués de sondes Watermark (Irrometer Co., USA) connectées à une carte Minisene (Urbasense, Fr) qui permet d'enregistrer instantanément les données et de les stocker sur des serveurs. Les données mesurées sont exprimées en ohm qui seront converties en cbar et en valeur absolue par l'application d'une courbe de calibration.

Chaque arbre est équipé de trois sondes qui sont installées sur le chemin de développement des racines au fur et à mesure que l'arbre se développe (Figure 4. 2). L'arbre qui vient d'être transplanté n'a des racines qu'au niveau de sa motte. Les racines se déploient dans le sol pour chercher de l'eau et par ailleurs favoriser son ancrage dans le sol. Pour suivre la dynamique des racines dans le sol, les sondes sont disposées comme suit :

- **S1** : dans la motte à une profondeur de 25 cm
- **S2** : à 40cm de la bordure de la motte et à une profondeur de 25 cm dans le sol.
- **S3** : à 40cm de la bordure de la motte et à une profondeur de 75 cm dans le sol.

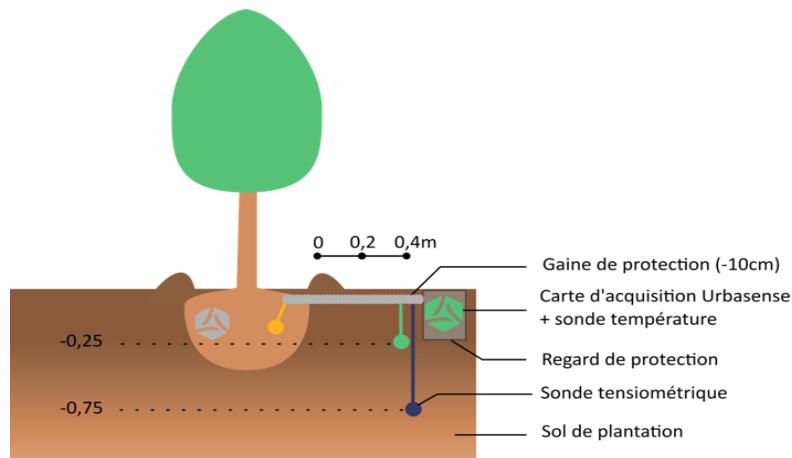


Figure 4. 2 : Schéma de disposition des sondes au pied de l'arbre



Figure 4. 3 : Installation du dispositif des sondes tensiométriques au pied d'un arbre (Quercus robur) nouvellement transplanté dans un parc situé à chatou en Ile de France (arbre transplanté en décembre 2020, dispositif installé le 22/01/2021 par Kosso SENE et Anass Benthamé, technicien à Urbasense)

1.4 Données recueillies des dispositifs utilisés :

Le dispositif fournit une mesure de la tension de l'eau du sol qui mesure la force avec laquelle l'eau est retenue dans le sol en raison de forces capillaires. Au niveau de chaque arbre, les mesures tensiométriques sont enregistrées toutes les 8h et forment des séries temporelles et elles remontent quotidiennement sur les serveurs d'Urbasense. Pour faciliter la lecture, les données ont été exprimées en cbar ($1\text{cbar}=1\text{kPa}$) avec une gamme de mesure en valeur absolue entre 0 et 250cb.

1.5 Traitement des données brutes : nettoyage et lissage

Les données sont extraites des tables à l'aide des requêtes SQL avec l'interface MySQL pour les 3609 arbres utilisés dans cette étude. Nous avons effectué tous les traitements à l'aide du logiciel statistique R, version 4.2.2 (The R Foundation for Statistical Computing). Toutes les tensions hydriques mesurées par les trois sondes sont extraites et classées pour chaque arbre. Nous avons sélectionné les arbres qui ont été suivis pendant au moins une saison sans interruption allant de l'installation du dispositif jusqu'à la fin du premier été après transplantation. Cette démarche nous permet d'avoir suffisamment de données brutes pour chaque arbre suivi pour pouvoir étudier son comportement racinaire pendant cette période.

Un pré-traitement a été appliqué aux données brutes consistant à les nettoyer mais aussi à les lisser pour une meilleure analyse. Le processus de nettoyage des données implique plusieurs étapes clés. Tout d'abord, il est essentiel de détecter et de traiter toute valeur aberrante, qui pourrait résulter d'erreurs de mesure ou de dysfonctionnements des capteurs. De plus, les valeurs manquantes ont été gérées de manière appropriée, en ayant recours à des méthodes d'interpolation ou d'exclusion.

Une attention particulière a été portée à la cohérence des valeurs enregistrées avec les plages de mesure attendues pour chaque sonde tensiométrique. Des vérifications et des corrections ont été effectuées pour les valeurs situant en dehors de ces plages. Le bruit, issu de fluctuations aléatoires ou d'interférences extérieures, a été également réduit grâce à des techniques de lissage ou de filtrage. Une moyenne journalière a été appliquée aux données relevées. En effet, trois mesures d'intervalle de 8h ont été relevées par jour. Aussi, une moyenne mobile de 5 valeurs correspondant à 5 jours a été appliquée pour lisser la série temporelle et faciliter les analyses des données.

Une synchronisation temporelle des données enregistrées par les différentes sondes a été faite et parallèlement, la comparaison des données des capteurs tensiométriques avec d'autres sources d'information, telles que les relevés météorologiques, les données sur le sol, sur le climat etc.

À partir du pré-traitement appliqué aux données selon les critères cités plus haut, nous sommes passés de 3609 à 2869 arbres à étudier.

1.6 Analyses statistiques appliquées aux données traitées : test non paramétrique

Nous avons évalué la normalité des données et il s'est avéré que nos données ne suivent pas la distribution normale donc des tests statistiques non paramétriques sont appliqués. Nous avons utilisé dans cette étude le test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour évaluer la robustesse des résultats. Ce test a été appliqué sur les jeux de données utilisées et sur tous les indicateurs d'activités racinaires déterminés dans cette étude.

1.7 Données des avis d'experts sur la reprise

Tous les arbres utilisés dans cette étude font l'objet d'un suivi personnalisé par des professionnels qui émettent des bulletins d'arrosage hebdomadaire et d'un bilan annuel sur l'état de reprise des arbres. En effet, ils analysent d'abord les courbes tensiométriques en plus ils sont en contact permanent avec les responsables de la gestion du patrimoine arboré ou les opérateurs qui interviennent directement sur les sites pour s'assurer de l'état visuel des arbres. Compte tenu de tous ces paramètres ils envoient des conseils pour l'arrosage des arbres. En plus, à la fin de chaque année de suivi, ces professionnels émettent des avis, sur l'état de la reprise racinaire de chaque arbre. Ces avis reposent sur trois niveaux qu'ils attribuent la note 0, 1, 2 signifiants respectivement mauvaise reprise, reprise moyenne et bonne reprise.

2 Construction du modèle de suivi d'activité racinaire (SARa)

2.1 Modèles de croissance et de développement racinaire existants

Plusieurs études de modélisations (PAGES & ARIES, 1988; Jourdan & Rey, 1997; Dupuy, Gregory, et al., 2010; Barczi et al., 2018; Pagès et al., 2020; Berland, 2020; Masson et al., 2022) ont été faites pour représenter la dynamique et le fonctionnement du système racinaire, très complexe, dans le but d'étudier et de comprendre son fonctionnement. Parmi ces modèles, il y a des modèles de représentation de données qui consistent à analyser des mesures collectées sur les racines, des modèles mécanistiques permettant de traduire le comportement du végétal

et comprendre le fonctionnement du système racinaire et des modèles prédictifs dont le but est d'évaluer l'évolution d'un système agronomique ou écologique à travers la dynamique racinaire.

Bien que ces types de modèles soient largement reconnus en tant qu'outils scientifiques de référence, leurs limitations en termes d'adaptabilité et plus particulièrement les coûts généralement élevés associés à leur configuration restreignent leur utilisation pour la gestion pratique sur le terrain. Cette réalité justifie une fois de plus la mise en place de modèles de croissance plus simples, caractérisés par une poignée de paramètres sensibles, tout en acceptant des objectifs moins ambitieux par rapport aux approches basées sur une compréhension physique exhaustive.

Dans le contexte de la reprise des arbres urbains, la nécessité de développer un modèle d'activité racinaire (Ma et al., 2022), en contournant l'utilisation des modèles de croissance et de développement existants, trouve sa justification dans les spécificités propres à l'environnement urbain et aux enjeux qui en découlent. La méthode tensiométrique constitue un moyen fiable pour juger l'état de reprise d'un arbre nouvellement transplanté (BENSAOUD & Marié, 2000; Tron, Isbérie, et al., 2013). À partir des courbes d'évolution des données, elle permet, ainsi, d'attester l'existence de racines actives, donc vivantes, dans le sol, constituant un critère indéniable de bonne reprise.

2.2 Qualification d'une activité racinaire

Une bonne régénération des racines des arbres après plantation ou après la dormance pour certaines espèces, est un facteur primordial pour la réussite de la survie et de la croissance de l'arbre. En effet, la survie et la croissance des plantes après transplantation dépendent de la rapidité et de l'intensité avec les lesquelles leur système racinaire se développe (Shishkova et al., 2008). Dans le cas des arbres urbains qui sont généralement cultivés en pépinière pendant plusieurs années avant qu'ils soient transplantés, l'arrachage avec les blessures racinaires infligées, supprime la plupart des racines fines assurant essentiellement les prélèvements en eau et les éléments nutritifs. Ainsi la mise en place de nouvelles racines autrement dit l'émergence des premières nouvelles racines peut rétablir cette alimentation en eau, on parle ainsi de la reprise de l'activité racinaire.

L'activité racinaire peut être qualifiée à travers la tension du sol qui est une approche essentielle pour évaluer l'interaction entre les racines des arbres et leur environnement souterrain. Cette

méthode se fonde sur la surveillance des variations de tension dans le sol (Figure 4. 4), qui résultent des processus d'absorption d'eau par les racines. Lorsqu'un arbre est actif dans la recherche et l'absorption d'eau, ses racines créent un effet de succion dans le sol. Cette succion, également appelée tension, est détectée par des capteurs tensiométriques spécialement conçus pour mesurer cette variation.

Les variations du potentiel hydrique sont généralement liées à :

- Un assèchement par drainage ou par l'atmosphère si l'augmentation de la tension est de faible intensité,
- Un assèchement dû à une activité racinaire lorsque l'augmentation de la tension est de forte intensité,
- Une ré-humectation (précipitation, arrosage) lorsque la diminution de la tension est brutale.

En surveillant en continu la tension du sol à différentes profondeurs et emplacements, il devient possible de qualifier l'activité racinaire.

Sur le graphique ci-dessus, l'évolution de ces trois courbes des sondes installées à des niveaux et profondeurs différents, correspond à des phases d'assèchement et de ré-humectation.

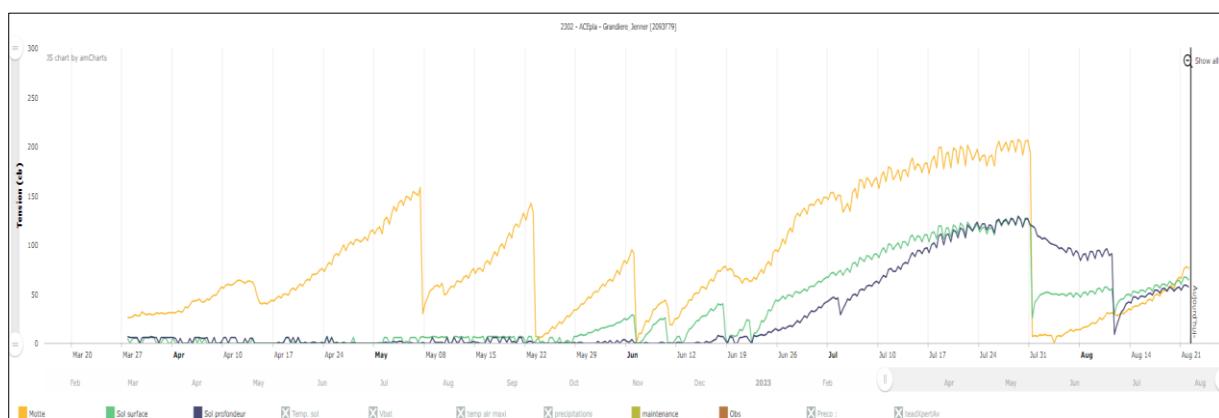


Figure 4. 4 : Extrait de courbes de suivi de l'évolution de la tension de l'eau (en cbar) dans le sol d'un arbre suivi ; la sonde 1 (jaune) installée dans la motte (25cm de profondeur) ; la sonde 2 (verte) installée dans la fosse de plantation à 40cm du pied de l'arbre (25cm de profondeur) ; la sonde 3 (violet) installée dans la fosse de plantation à 40cm du pied de l'arbre (75cm de profondeur)

2.3 Méthode de construction du modèle SARa (Figure 4. 5) :

Les racines assèchent le sol de façon significative à travers leur activité. Il est donc possible de déterminer l'activité racinaire en étudiant la cinétique de la tension hydrique du sol. La méthode SARa a pour objectif de qualifier l'activité racinaire à partir de mesures tensiométriques et prédire la reprise des arbres nouvellement transplantés.

La méthode est composée de trois étapes :

Étape 1 : Application d'un seuil de tension à partir duquel il y a possiblement un début d'activité racinaire (1).

Étape 2 : Calcul de la vitesse d'assèchement du sol et appliquer un seuil de la vitesse d'assèchement du sol à partir duquel il y a possiblement une activité racinaire (2).

Étape 3 : Identification des périodes d'assèchement du sol dont la durée est supérieure à un temps donné. (3)

2.4 Détermination des paramètres du modèle SARa

Pour déterminer le profil d'évolution de la tension hydrique correspondant à une activité racinaire, nous avons consulté les travaux d'analyse de données de tension hydrique menés par des experts (ingénieurs agronomes d'Urbasense cf. 1.7) sur plusieurs centaines de situations. Cette étude nous conduit à proposer trois paramètres de seuils indépendamment du type de végétal étudié. Ils permettent de caractériser la présence d'une activité racinaire significative au point de mesure (emplacement des sondes) :

Seuil de tension minimum (α)

Correspond à la valeur tensiométrique minimum à partir de laquelle il est possible de déterminer un début d'activité racinaire.

Dans la littérature, des seuils de tensions sont souvent appliqués pour le déclenchement de l'irrigation en fonction des cultures, du système d'irrigation, du sol et d'autres paramètres (D. Wang et al., 2007; Dabach et al., 2015; Sherman et al., 2016; C. Zhang & Li, 2021). Pour notre cas, il fallait appliquer un seuil qui nous renseigne sur le début d'assèchement du sol par les racines avant même le déclenchement d'irrigation. Nous avons utilisé des seuils fournis par les experts d'Urbasense.

Les seuils sont évalués à partir des jeux de données de tensions de sondes watermark divisés en deux avec présence racinaire et absence racinaire (exemple : les premières données recueillies dans la motte où il y a sûrement de racines et celles en dehors de la motte où les racines de l'arbres n'y sont pas encore déployées).

Pente minimum (β)

Correspond à la vitesse minimum d'évolution de la tension hydrique du sol à partir de laquelle il est possible de déterminer une activité racinaire. Ce paramètre est exprimé en cbar-1 (en fonction de l'unité de temps utilisée). Il prend généralement une valeur comprise entre 0.5 et 10 cbar/jour.

Y : Tension (cbar)

X : Temps

$$\beta = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

Temps d'activité (ΔT)

Correspond au nombre de jours durant lesquels la mesure tensiométrique est supérieure à α et la vitesse d'évolution de la tension par jour est supérieure à β . ΔT est exprimé en nombre de jour dans cette étude.

Ainsi, nous proposons de considérer la présence d'une activité racinaire lorsque les valeurs mesurées sont supérieures à α et que la vitesse d'évolution est supérieure à β pendant une durée supérieure ou égale à ΔT .

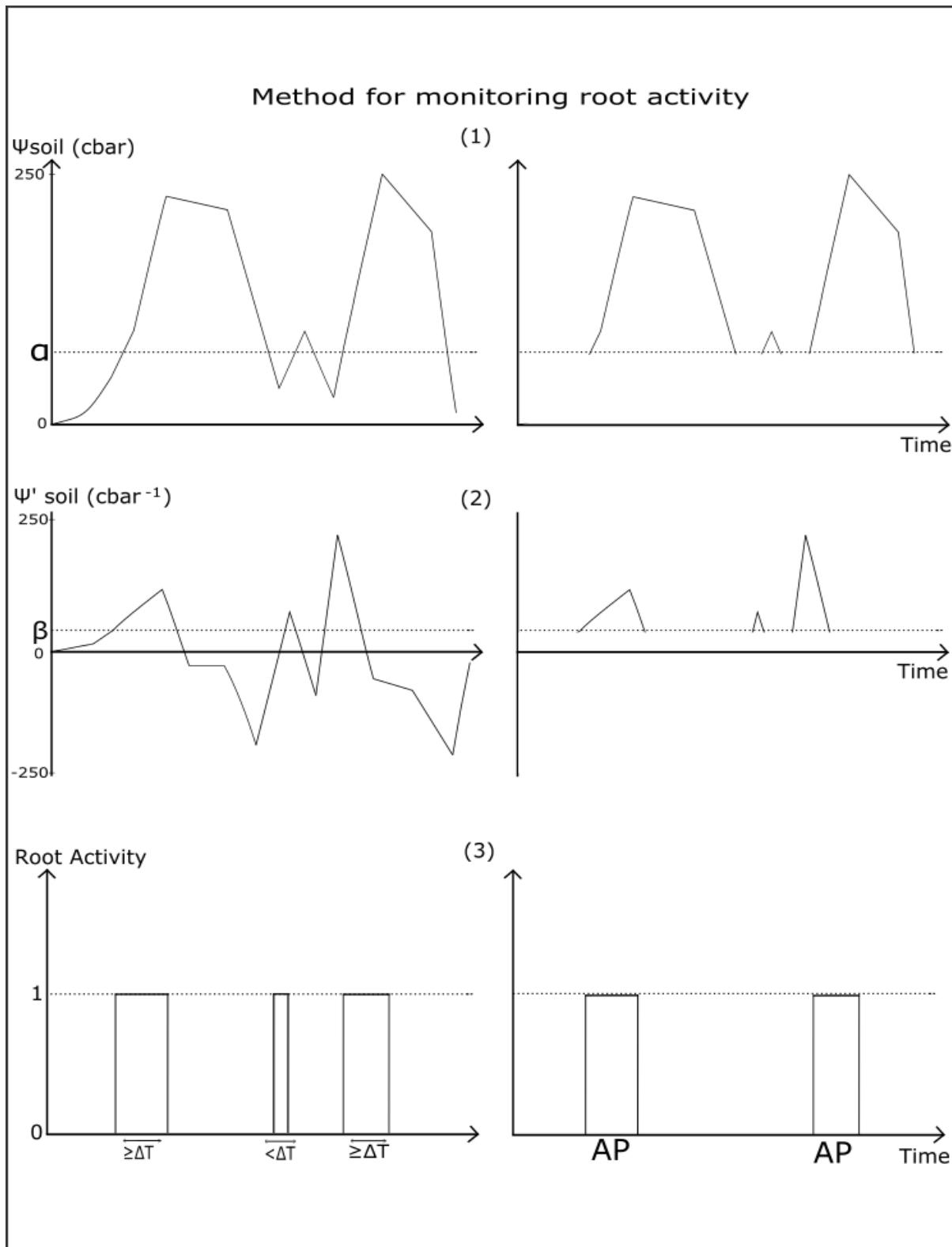


Figure 4.5 : Les différentes étapes de la méthode de suivi d'activité racinaire (SARA) ; étape 1 : application d'un seuil de tension à partir duquel il y a possiblement un début d'activité racinaire (1) ; étape 2 : Calcul de la vitesse d'assèchement du sol et appliquer un seuil de la vitesse d'assèchement du sol à partir duquel il y a possiblement une activité racinaire (2) ; étape 3 : Identification des périodes d'assèchement du sol dont la durée est supérieure à un temps donné. (3).

2.5 Calcul d'indicateurs avancés de la reprise racinaire

Nous avons produit quatre indicateurs de reprise pour chaque arbre sur l'année de suivi. Ils permettent de caractériser les périodes d'activité racinaire déterminées selon la méthode décrite dans cette étude :

- **NPA** (Nombre de Périodes d'Activités),

Cet indicateur est calculé sur toute l'année de suivi. La période d'activité est le moment pendant lequel nous considérons que l'arbre est en activité racinaire pendant une durée donnée. Elle est calculée au niveau de la motte et en extérieure de la motte. La somme des périodes donne le nombre total de périodes d'activités racinaires de l'arbre en fonction du niveau de mesure (motte et extérieure de la motte sur l'année de suivi).

- **NJA** (Nombre de Jours d'Activités),

Il correspond au nombre de jour total sur l'année pendant lequel l'arbre est en activité racinaire. Cet indicateur permet de déterminer les jours où l'arbre transplanté est en activité racinaire. Il est calculé depuis l'installation du dispositif jusqu'au début de l'automne suivant la plantation.

- **SIA** (Somme des Intensités d'Activités),

Cet indicateur nous renseigne sur l'intensité d'une activité racinaire. Il nous permet d'évaluer si l'intensité est très forte ou pas et est calculé sur toute l'année de suivi.

- **NJL** (Nombre jours au-delà de la Limite de mesure de la sonde),

Il correspond au nombre de jour total où la valeur maximale de la sonde est atteinte équivalent dans certain cas à un assèchement important du sol. Cet indicateur nous permet d'évaluer le niveau de stress hydrique de l'arbre après plantation.

2.6 Analyses statistiques appliquées aux résultats des indicateurs calculés :

Des analyses statistiques, qui permettent d'évaluer l'anticipation de la reprise racinaire de l'arbre après transplantation à partir des indicateurs de reprises racinaires, ont été appliquées sur l'ensemble des données des arbres étudiés.

2.6.1 Visualisation de la distribution des données

Nous avons utilisé des boxplots pour visualiser la distribution des individus d'arbres au niveau de chaque point de mesure en fonction de l'année de suivi et pour chaque indicateur calculé.

Les box-plots (boites à moustache) utilisées dans cette étude représenteront la médiane, le premier et troisième quartile des données et les valeurs minimales et maximales.

Ce test statistique a été appliqué aux données aussi pour tester la significativité de la différence entre les points de mesures pour chaque année de suivi et entre les années de mesures. Par exemple, nous avons appliqué le test de wilcoxon pour vérifier la différence statistique des nombres de périodes d'activités (**NPA**) des arbres en fonction des points de mesure (dans la motte et dans le sol de plantation) et en fonction de l'année de suivi pour les mêmes points de mesures.

2.6.2 Application de l'analyse en composantes principales (ACP)

Pour déterminer les indicateurs d'activités racinaires qui discriminent mieux notre jeu de données, nous avons appliqué la méthode de l'analyse des composantes principales. Cette démarche nous permet de choisir les indicateurs d'activités racinaires qui peuvent être utilisés pour évaluer et par ailleurs anticiper la reprise des arbres urbains.

Nous avons comparé nos résultats avec les données des avis des experts évaluant une reprise racinaire pour déterminer la relation avec nos indicateurs et la note de reprise donnée par ces professionnels. Nous avons utilisé aussi dans ce cas des boxplots pour visualiser d'abord les résultats des indicateurs en fonction des avis donnés par les professionnels. Pour évaluer la performance du modèle SARa, nous avons déterminé une matrice de confusion entre les résultats obtenus du modèle et les avis des experts.

3 Application du modèle SARa

Nous avons évalué tous les indicateurs de reprises appliqués aux données tensiométriques des arbres suivis par l'entreprise Urbasense.

3.1 Résultats d'analyses statistiques sur les indicateurs de reprise

3.1.1 Résultats de la visualisation de la distribution des données

La Figure 4. 6 présente le nombre de périodes d'activité racinaire (NPA) des arbres étudiés pour chaque sonde et chaque année après la transplantation.

En année 1 (A1 : première année de suivi après plantation), la médiane de la sonde dans la motte (S1) est supérieure à celle de 40cm de la bordure de la motte avec une profondeur de 25cm (S2), indiquant un nombre de périodes d'activité plus important dans la motte. Ce résultat est vérifié par un test statistique non paramétrique (Wilcox, $p = 0,0003$, très hautement

significative quand $p<0,005$) et est cohérent avec le fait que les racines sont présentes uniquement dans la motte juste après la transplantation. Idem pour les sondes se trouvant à 40cm de la bordure de la motte avec une profondeur de 75cm (S3) dont le nombre de périodes d'activités racinaire est quasiment nul pour la première année de suivi après plantation.

En année 2 (A2 : deuxième année de suivi après plantation), nous avons noté que le NPA S1 est quasiment égale au NPA S1 de A1. Par contre, le NPA S2 augmente significativement par rapport à A1. Le même constat est relevé pour le NPA S3.

En année 3 (A3 : troisième année de suivi après plantation), le NPA semble constant sur les trois niveaux de mesures (S1, S2 et S3). Néanmoins, le NPA diminue sur les trois niveaux par rapport à A2.

Les résultats du NPA déterminées pour chaque arbre montrent bien la dynamique racinaire de l'arbre dans le sol. Après transplantation de l'arbre, l'activité racinaire est plus importante dans la motte et au fil du temps les racines se déploient dans le sol de plantation. Suivant l'installation des sondes, nous avons remarqué un NPA très important en première année dans la motte et peu dans le sol de plantation.

Pour la plupart des arbres, les racines se déploient en profondeur du sol de plantation qu'à partir de la 2ème année de suivi. À partir de la 3ème année de suivi il y a autant de NPA au niveau de la motte qu'au niveau du sol de plantation, par contre, nous avons constaté une diminution de NPA sur S1, S2 et S3. En effet, à une certaine durée après la transplantation, les arbres déploient leurs racines dans tout leur environnement de plantation, il peut y avoir plusieurs NPA dans d'autres niveaux en dehors de l'emplacement des sondes.

Pour étayer l'hypothèse de la différence entre les NPA dans chaque niveau de mesure et chaque année de suivi, nous avons appliqué le test statistique de Wilcox. Les résultats statistiques stipulent qu'entre A1 et A2, il n'y a pas de différence significative pour les NPA de S1, alors qu'une différence hautement significative est constatée entre pour les NPA de S2 (Tableau 4. 2).

C'est-à-dire il y a moins de périodes d'activités au niveau du sol de plantation en première année qu'en deuxième année de suivi. Nous avons observé des résultats similaires sur les autres indicateurs.

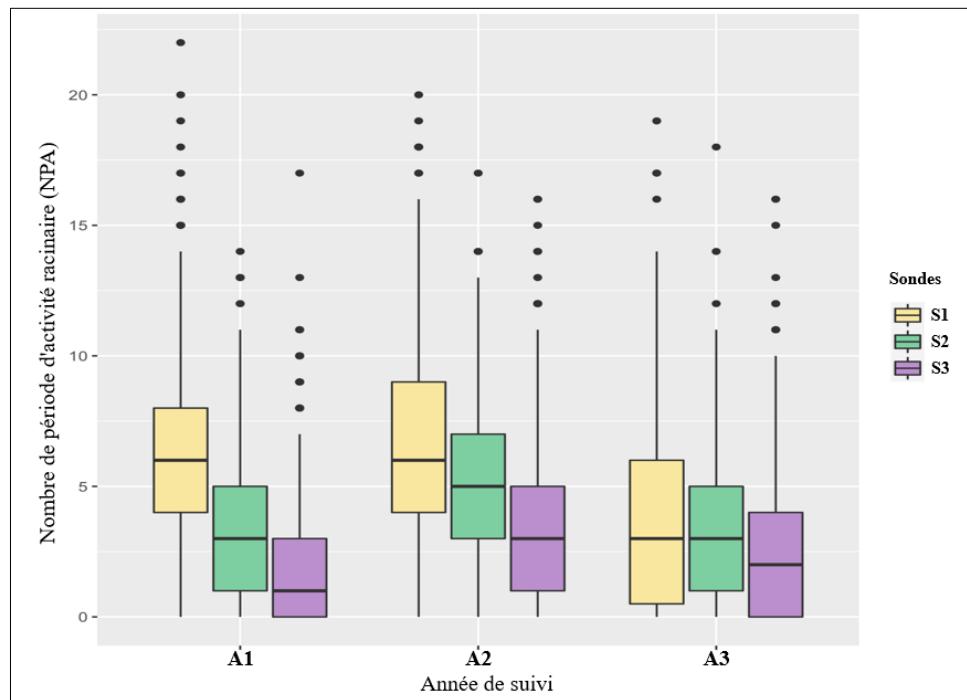


Figure 4. 6 : Distribution des arbres sur la relation entre le nombre de périodes d'activités racinaires (NPA) au niveau de chaque sonde en fonction de l'année de suivi. Le NPA des arbres en première année est significativement plus importante dans la motte qu'en sol de plantation.

Tableau 4. 2 : Matrice de comparaison des différences de significativité des NPA des arbres représentés sur la boîte à moustache entre les points de mesure (S1, S2, S3) avec les années de suivis (A1, A2, A3).

Nombre de Période d'Activités (NPA)									
	S1A1	S1A2	S1A3	S2A1	S2A2	S2A3	S3A1	S3A2	S3A3
S1A1	1	0.099	0	0	0	0	0	0	0
S1A2		1	0	0	0	0	0	0	0
	S1A3		1	0.845	0	0.087	0	0.033	0
		S2A1		1	0	0.012	0	0.002	0
			S2A2		1	0	0	0	0
				S2A3		1	0	0	0
					S3A1		1	0	0
						S3A2		1	0
							S3A3		1

D'après le test wilcox il n'y a pas de différences significatives lorsque $p > 0.05$, si $p < 0.05$: la différence est significative, $p < 0.01$: la différence est très significative, $p < 0.001$: la

différence est très hautement significative. Alors, les NPA des arbres dans la motte (S1) en A1 et A2 n'ont pas de différence significative alors qu'il y a une différence très hautement significative des NPA en dehors de la motte (S2 et S3) entre A1 et A2.

De la même manière que le nombre de période d'activités (NPA), les autres indicateurs représentés dans les figures (Figure 4. 7 ; Figure 4. 8) ont été évalués aussi évalués statistiquement dans les tableaux (Tableau 4. 3 ; Tableau 4. 4).

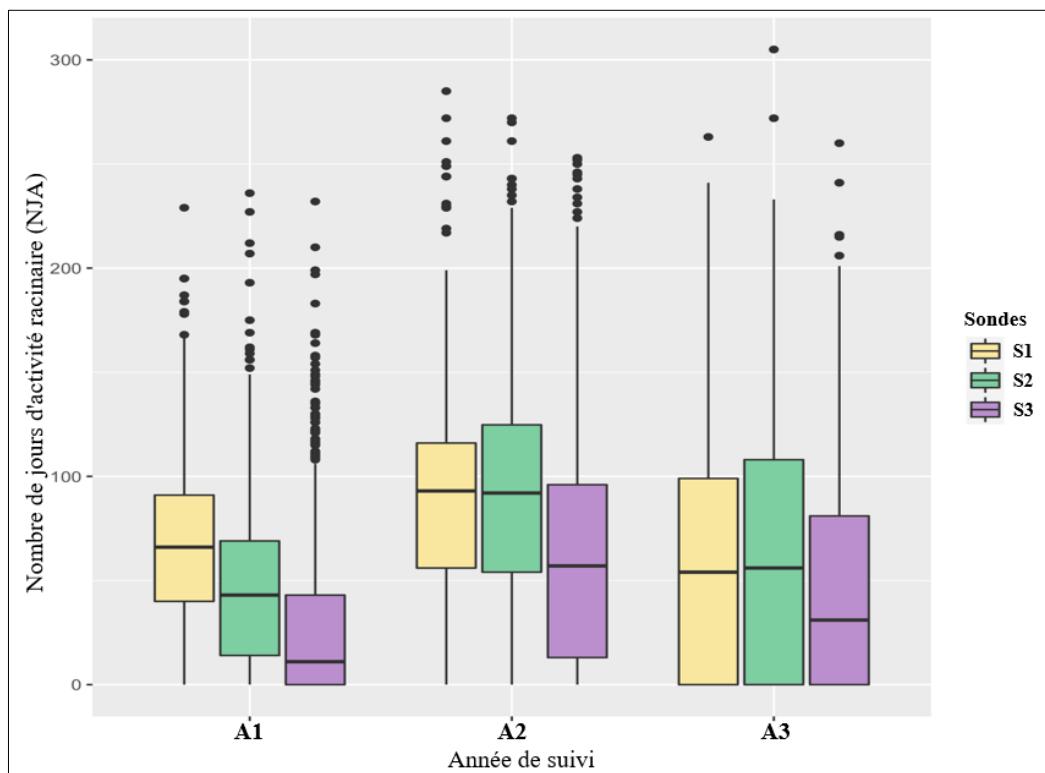


Figure 4. 7 : Distribution des arbres sur la relation entre le nombre de jours d'activités racinaires (NJA) au niveau de chaque sonde en fonction de l'année de suivi.

Tableau 4. 3 : Matrice de comparaison des NJA des arbres représentés sur la boîte à moustache entre les points de mesure (S1, S2, S3) avec les années de suivis (A1, A2, A3).

Nombre de jours d'Activités (NJA)									
	S1A1	S1A2	S1A3	S2A1	S2A2	S2A3	S3A1	S3A2	S3A3
S1A1	1	0	0	0	0	0.001	0	0	0
S1A2		1	0	0	0.454	0	0	0	0
		S1A3	1	0	0	0.174	0	0.119	0
			S2A1	1	0	0	0	0	0
				S2A2	1	0	0	0	0
					S2A3	1	0	0.966	0

						S3A1	1	0	0
						S3A2	1	0	
						S3A3	1		

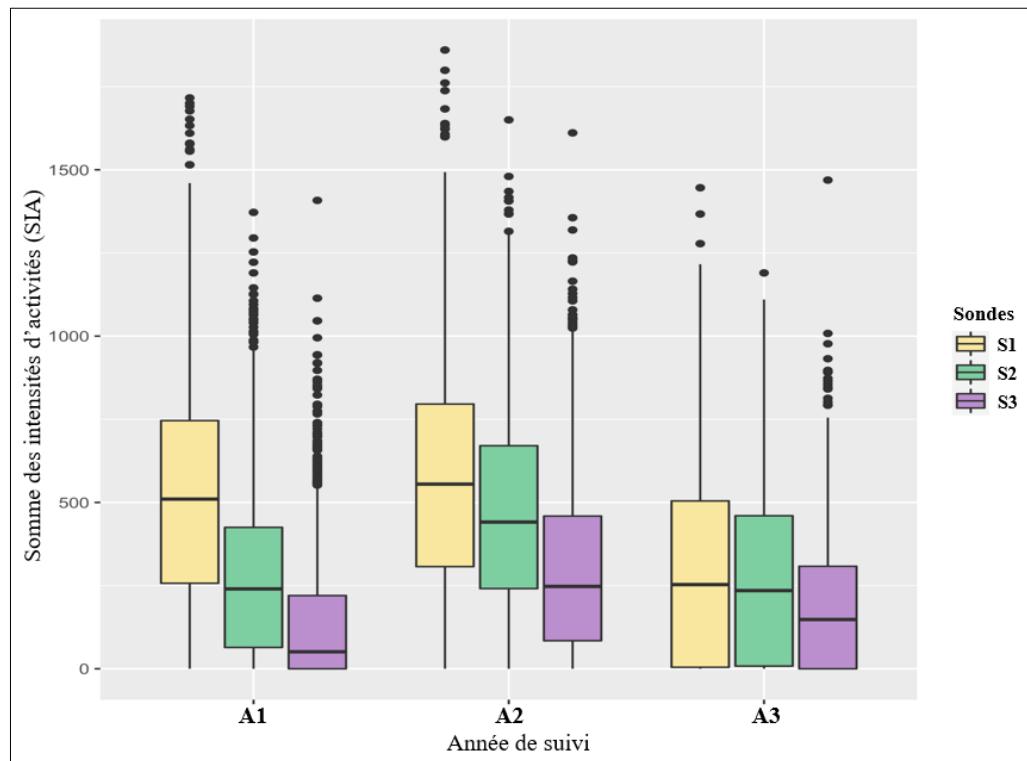


Figure 4.8 : Distribution des arbres sur la relation entre la somme des intensités d'activités racinaires (SIA) au niveau de chaque sonde en fonction de l'année de suivi.

Tableau 4.4 : Matrice de comparaison des SIA des arbres représentés sur la boîte à moustache entre les points de mesure (S1, S2, S3) avec les années de suivis (A1, A2, A3).

Somme d'intensité des activités									
	S1A1	S1A2	S1A3	S2A1	S2A2	S2A3	S3A1	S3A2	S3A3
S1A1	1	0.004	0	0	0	0	0	0	0
S1A2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	S1A3	1	0.684	0	0.39	0	0.42	0	
		S2A1	1	0	0.621	0	0.055	0	
			S2A2	1	0	0	0	0	
				S2A3	1	0	0.072	0	
					S3A1	1	0	0	
						S3A2	1	0	
							S3A3	1	

3.1.2 Résultat de l'ACP

Les résultats de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) indiquent que les arbres sont principalement représentés par les deux premiers axes. L'axe 1 explique 53% de la variance totale, ce qui démontre qu'il représente une part importante de la variabilité observée, de même, l'axe 2 explique environ 25% de la variance. En combinant les informations de ces deux axes, nous obtenons une vue significative de la structure sous-jacente de individus, bien que d'autres dimensions puissent également contribuer à la variabilité non expliquée par ces axes principaux.

Les indicateurs qui représentent mieux les individus sont ceux qui ont des charges élevées sur les axes 1 & 2. Ces indicateurs ont une forte influence sur la disposition des individus dans l'espace de l'ACP. De plus, lorsque nous examinons les cercles de corrélation, nous pouvons voir que les indicateurs sont fortement corrélés avec les composantes principales qui expliquent la proximité entre les individus. En d'autres termes, ces variables jouent un rôle clé dans la structuration des similitudes et des différences entre les individus dans l'analyse. Ainsi, les résultats de l'ACP montrent que les indicateurs NPA et SIA discriminent mieux notre jeu de données (Figure 4. 9).

On a constaté que l'axe 1 était significativement corrélé et qu'il avait des valeurs élevées de cos² pour les indicateurs cités. Le deuxième axe est corrélé et présente des valeurs cos² élevées pour le nombre de jour de 250cb. L'année est également corrélée au deuxième axe, mais avec une valeur cos² légèrement faible. Le carré des cosinus (cos²) représente la contribution relative de chaque indicateur. Une valeur élevée de cos² pour une variable dans une composante principale indique que cette variable est fortement liée à cette composante.

D'après les résultats, nous constatons que la variable NPA est un indicateur clé qui contribue le plus à la structuration de nos données selon les deux premiers axes de l'ACP. Cet indicateur qui discrimine mieux les données, peut être utilisé comme une variable pour évaluer la reprise des arbres urbains après plantation.

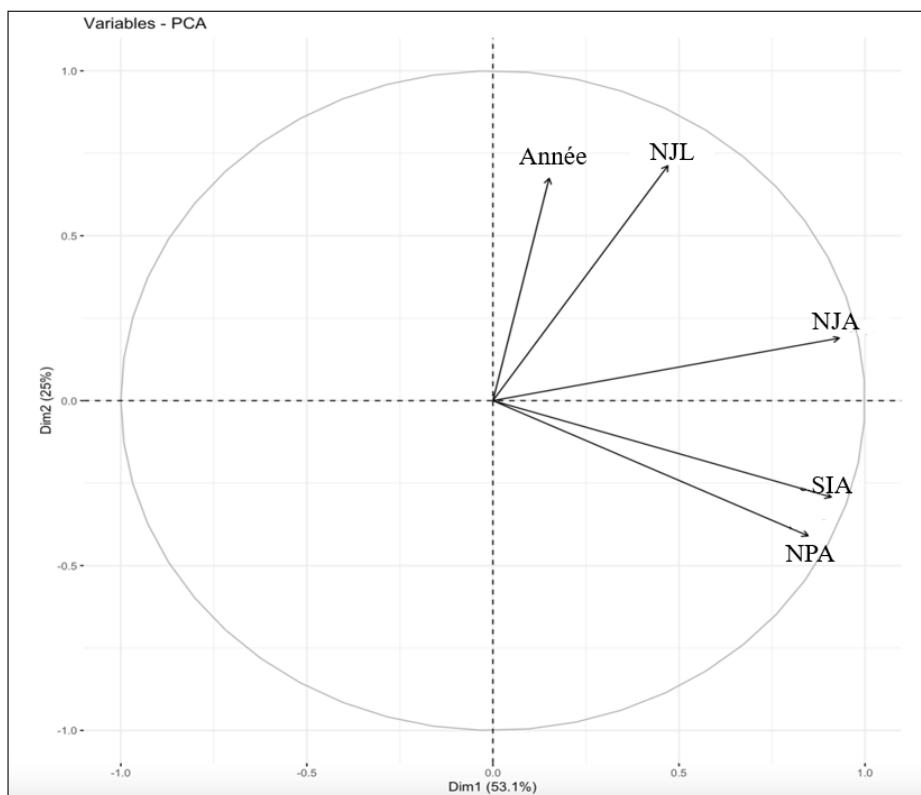


Figure 4. 9 : Résultat de l'ACP sur les indicateurs d'activités racinaires (année : l'année de suivi, NPA : Nombre de Périodes d'activités, NJA : Nombre de jours d'Activités, SIA : Somme d'Intensité des Activités, NJL : Nombre jours au-delà de la limite de mesure de la sonde).

3.2 Résulats de l'évalution de l'indicateur NPA du modèle avec les avis d'expert sur la reprise

Nous avons comparé nos résultats avec les avis d'experts qui consistent à attribuer des notes (0, 1 et 2) sur le niveau de reprise des arbres suivi après plantation. Nous avons représenté arbre dans une boite à moustache (Figure 4. 10) le NPA des arbres en fonction des avis de reprise attribués à chaque. Pour la première année de suivi, nous avons constaté que les arbres ayant attribué la note 2 (bonne reprise) ont en moyenne 6 NPA dans la motte, 4 NPA dans le sol à 40cm de profondeur (S2) et 2 à 75cm. Ceux qui ont été noté 1 (reprise moyenne), ont 4 NPA dans la motte et pas de NPA dans le sol de plantation (S1 et S2). Les arbres ayant la note 0 (pas de reprise) correspondent à ceux qui n'ont pas repris leur activité racinaire avec 0 NPA au niveau de la motte et du sol de plantation.

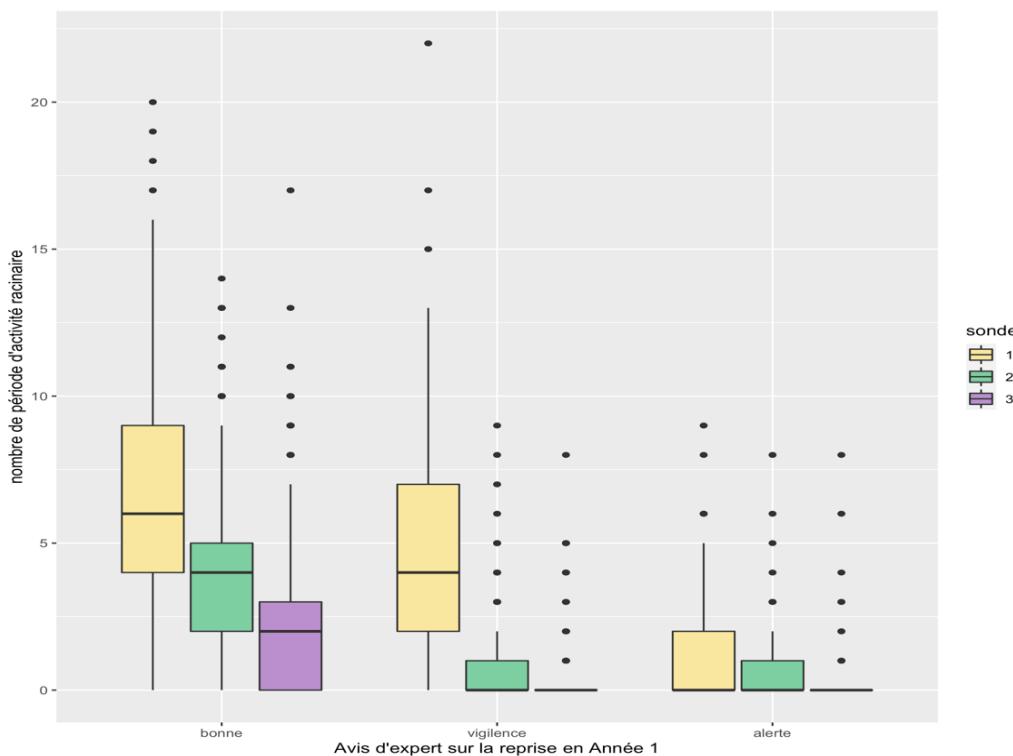


Figure 4. 10 : Distribution des arbres sur la relation entre l'indicateur NPA au niveau de chaque sonde en fonction des avis donnés par les experts sur la reprise de chaque en première année de suivi. La médiane des boxplots du NPA des arbres ayant une bonne note de reprise est supérieure par rapport à la médiane des autres.

Lors de la deuxième année de suivi (Figure 4. 11), nous constatons une évolution des NPA dans mottes ainsi que le sol de plantation pour les arbres notés 1 et 2. Cependant, Les arbres qui ont une reprise moyenne ont des périodes d'activités en profondeur du sol de plantation faibles et ceux qui ont une note 0 (pas de reprise) n'ont pas de périodes d'activités dans les différents niveaux de mesure.

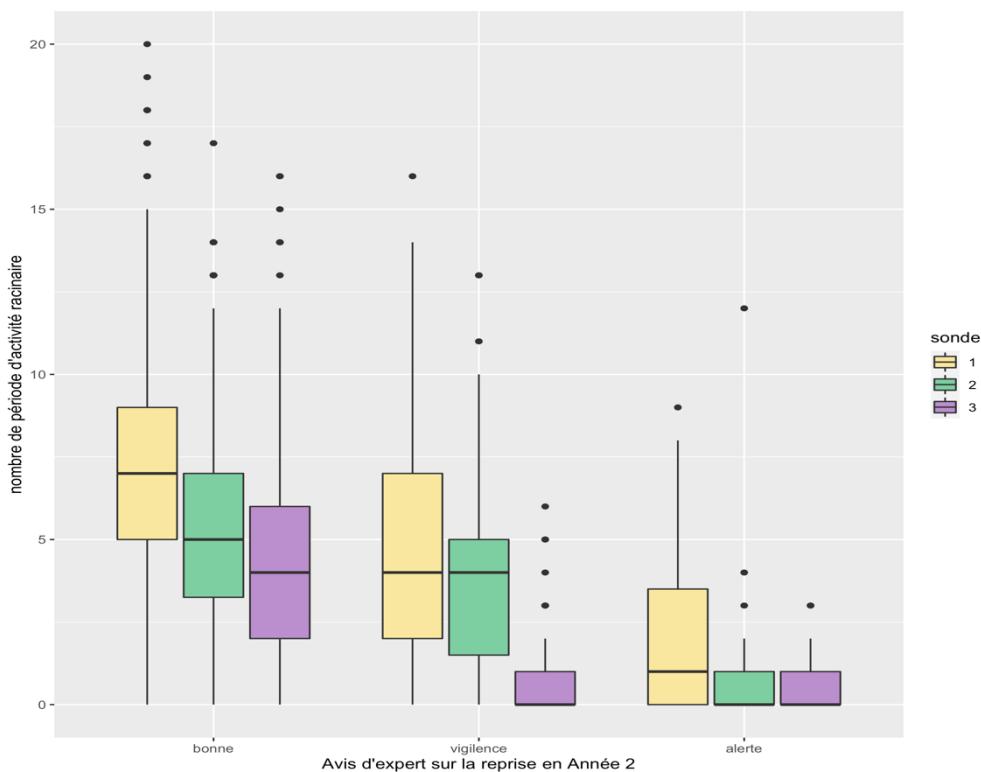


Figure 4. 11 : Distribution des sujets sur la relation entre le nombre de périodes d'activités au niveau de chaque sonde en fonction des avis donnés par les experts sur la reprise de chaque en première année de suivi. La médiane des boxplots du nombre de périodes d'activités racinaires des sujets ayant une bonne note de reprise est très importante par rapport à la médiane des autres boxplots avec une mauvaise reprise (alerte). La médiane des boxplots des sujets qui ont une note alerte est égale à 0.

3.3 Discussion des résultats de l'évaluation du modèle

3.3.1 Effet de l'eau du sol dans l'activité racinaire des arbres en milieu urbain

L'eau, en tant que ressource essentielle, a un impact profond sur la croissance, le développement et le comportement adaptatif des racines (Wu et al., 2017). Les racines, en retour, réagissent de manière dynamique aux variations d'humidité du sol, modulant leur activité pour optimiser l'absorption d'eau et de nutriments (Peng et al., 2022). Elles ajustent leur comportement pour maximiser l'absorption d'eau et de nutriments lorsque l'humidité du sol est favorable. Lorsque le sol est suffisamment humidifié, les racines répondent en intensifiant leur croissance et en augmentant leur capacité à absorber l'eau (Mair et al., 2023).

Les capteurs, tels que les sondes de tension de l'eau dans le sol, offrent des moyens de détecter et de quantifier cette activité en temps réel, autant plus que cette activité est corrélée à l'humidité du sol. Ils mesurent la force avec laquelle les racines extraient l'eau du sol (Tron, Isbérie, et al., 2013). Lorsque les racines sont actives, elles exercent une pression sur l'eau du

sol, ce qui se traduit par une diminution de la tension du sol autour des racines. En surveillant les changements de tension du sol, les capteurs peuvent détecter l'activité racinaire.

3.3.2 Méthodes de détection de l'activité racinaire des arbres urbains transplanté

Les résultats de notre étude sur les 2869 arbres révèlent une activité racinaire importante en première année dans la motte (S1) par rapport à l'extérieur de celle-ci (S2 et S3), principalement en raison de la présence exclusive de racines dans la motte des arbres urbains en provenance des pépinières avant la transplantation. Ces racines sont activées de manière significative dès le début du suivi, alors qu'en deuxième année, la colonisation du sol par les racines est bien marquée, s'étendant jusqu'à 40 cm de profondeur atteignant la sonde 2. Cette colonisation racinaire est établie en troisième année, montrant des activités comparables entre la motte et le sol de plantation jusqu'à 70cm de profondeur (S3), ce qui rejoint les conclusions d'études antérieures démontrant la corrélation entre l'emplacement réel des racines dans le sol et les résultats de la méthode tensiométrique (BENSAOUD & Marié, 2000).

Pour évaluer la présence racinaire des arbres urbains dans le sol, des méthodes partiellement destructrices sont appliquées en l'occurrence le diagnostic racinaire permettant de réaliser des profils de sol en creusant pour déterminer l'occupation du sol par les racines à différents niveaux de profondeur et distances du tronc (ATGER & GENOYER, 2017). C'est le cas de Bensaoud et Marié (2000) qui ont procédé à une excavation racinaire à la deuxième année après la transplantation, suite à un suivi tensiométriques des arbres urbains, pour analyser de façon détaillée l'état de l'enracinement et observer la colonisation racinaire. Les résultats de l'excavation montrent que les racines sortent de la motte et colonisent le sol de plantation dès la 2^{ème} année de suivi. Ce qui confirme nos résultats montrant que le NPA dans le sol de plantation a augmenté significativement à partir de la 2^{ème} année de suivi.

La détermination d'une activité racinaire des arbres urbains à travers des données tensiométriques peut être remise en cause du fait, d'abord, de l'aspect du système racinaire, difficile à étudier et donc à comprendre (Dupuy, Gregory, et al., 2010; Masson et al., 2022), mais surtout de la variabilité très importante des paramètres qui peuvent influencer son activité (Schütt et al., 2022). De plus, nos données sont issues d'études opérationnelles où toutes les modalités pour mener à bien des études expérimentales ne sont pas contrôlées. L'installation est faite par des techniciens, ainsi le grand nombre d'installateurs ne permet pas de garantir une parfaite homogénéité des installations, par conséquent un biais lié à l'installateur pourrait être envisagé. Des problèmes liés aussi à l'électronique ou du réseau des objets connectés (iot)

peuvent surgir entraînant des trous dans les séries temporelles qui impacteront les données analysées.

Malgré, ces imperfections, force est de constater que les capteurs ont déjà démontré leur efficacité en agriculture et leur utilisation constitue une avancée technologique majeure qui permet une approche scientifique et ciblée de l'irrigation (J.-Y. Guo et al., 2022 ; Pahuja, 2022). Les capteurs de potentiel de matrice de sol, également connus sous le nom de sondes tensiométriques, mesurent la teneur en eau du sol en évaluant le potentiel matriciel (Paramasivam et al., 2000). Ils sont spécifiquement conçus pour évaluer l'aptitude de l'eau du sol à être extraite par les plantes. Ce potentiel matriciel reflète l'énergie requise pour extraire l'eau du sol et est influencé par les forces d'adhérence entre l'eau et les particules du sol (Tron et al., 2013). Ces capteurs comprennent une résistance en céramique poreuse et un câble en acier inoxydable (Irmak et al., 2014). La résistance en céramique est remplie d'un matériau sensible à l'humidité. À mesure que la teneur en eau du sol change, la résistance électrique de la céramique varie également. Le câble en acier inoxydable mesure cette résistance électrique et la convertit en potentiel matriciel (Kirkham, 2023).

Les sondes tensiométriques restent efficaces ainsi à la mesure de l'humidité du sol à différentes profondeurs et permettent de détecter les changements dans les conditions hydriques du sol (Haddon et al., 2023). Lorsque les racines de l'arbre commencent à absorber l'eau du sol, cela se traduit par une baisse de l'humidité mesurée par les sondes. Cette baisse d'humidité est un indicateur clé de l'activité racinaire et de la reprise de l'arbre. En surveillant en continu les données tensiométriques, on peut repérer le moment où l'activité racinaire commence à se manifester, indiquant ainsi que l'arbre s'adapte avec succès à son nouvel environnement. Nos résultats corroborent avec ce principe de fonctionnement des sondes tensiométriques. Cette information est précieuse pour les gestionnaires et les professionnels, car elle confirme que l'arbre est en train de s'établir et de s'implanter de manière réussie.

Les outils de surveillance de l'eau du sol, en détectant les changements d'humidité liés à l'activité racinaire, offrent un moyen fiable de déterminer précocelement si l'arbre commence à s'établir et à intégrer son système racinaire dans le sol environnant. Cependant, mettre en place un dispositif expérimental répondant toutes les normes sur des centaines arbres que nous avons utilisés dans cette étude, serait une approche robuste, mais très difficile à réaliser sur le plan financier et logistique. Toutefois, nous avons remédié à ce problème en mettant en place des

méthodes de détection et de nettoyage des données aberrantes, et en utilisant que des arbres qui ont été monitorés pendant au moins une saison.

Dans la recherche, les études faites sur l'activité racinaire sont généralement orientées vers des études *in vitro* pour contrôler et comprendre les phénomènes de la croissance racinaire qui est une conséquence de l'activité racinaire ou bien à partir des modèles de croissance ou par imagerie pour représenter la structure architecturale et fonctionnelle du développement racinaire (Jourdan et al., 1997 ; Kokutse et al., 2006 ; Fourcaud et al., 2008 ; Dupuy et al., 2010 ; Bizet, 2014 ; Gérard et al., 2017 ; Eylenbosch et al., 2018). Les racines étant cachées dans le sol, les observations *in situ* (excavation, arrachage etc.) restent difficile car elles sont destructives et nécessitent souvent un nombre d'arbres très limité pour évaluer le développement racinaire en longueur dans le temps (Plourbe, 2007). Cette étude s'est montrée innovante car elle met en évidence une méthode permettant aux professionnels de suivre en temps réel le développement racinaire des arbres urbains et de prédire la reprise après transplantation. L'une des applications immédiates est l'optimisation de l'arrosage des jeunes plantations qui peut être adapté aux besoins réels des végétaux.

3.3.3 Evaluation précoce de la reprise racinaire des arbres urbains

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer ou constater la reprise des arbres urbains après transplantation comme la mesure de la survie, la croissance des pousses, des feuilles, du tronc ou des tiges (Struve et Joly, 1992, Day et al., 1995 ; Radoglou et Raftoyannis, 2002 ; Harris et al., 2008 ; Pinto et al., 2011 ; Dostalek et al., 2014 ; Woolery et Jacobs, 2014 ; Koeser et al., 2014 ; Sherman et al., 2016). En revanche, il n'existe pas encore de consensus pour qualifier à l'unanimité la reprise d'un arbre urbain. Les évaluations de la longueur des pousses ou de l'état hydrique de la partie aérienne (tige, feuille) ou souterraine (racine) de l'arbre sont généralement utilisées pour déterminer la reprise des arbres (Beeson, 1994, Day et al., 1995, Buhler et al., 2007). Toutefois, dans notre étude nous avons évalué la reprise à partir des données de l'état hydrique du sol en déterminant l'activité racinaire.

Les résultats de l'étude de Sherman et al (2016) pour déterminer la reprise des arbres urbains ne mettent pas en évidence la relation entre l'elongation des pousses et l'état de l'eau (potentiel hydrique des racines ou du tronc par exemple) des arbres pendant les premières années de transplantation du fait de la croissance limitée des pousses lors de cette période critique pour les arbres en milieu urbain.

Les résultats mis en évidence dans cette étude sont pertinents lorsque la reprise est définie comme étant un processus biologique au cours duquel l'arbre transplanté devient entièrement connecté au cycle hydrologique du site de plantation (Rietveld, 1989, Grossnickle, 2005). Il existe plusieurs protocoles pour déterminer et mesurer le potentiel hydrique de l'arbre au niveau des pousses, des feuilles ou des racines. Mais comme il n'existe pas de protocoles ou de valeurs absolues permettant de qualifier la reprise des arbres urbains, et parce qu'il est complexe de trouver des arbres de référence appropriés, les évaluations de l'état de reprises par les mesures du potentiel hydrique sont souvent effectuées sous forme d'études comparatives (Sherman, 2016). L'activité racinaire, étant définie comme l'évolution de la tension de 0.5 et 8cbar par jour à partir d'un seuil entre 5 et 80cbar, est déterminée à travers de dires d'experts. Ces périodes représentent des cycles de dessèchement du sol où on considère que l'arbre est en activité racinaire et par conséquent en relation avec le cycle hydrologique du site de plantation. Il y a plusieurs facteurs qui peuvent faire varier le potentiel hydrique mesuré par la sonde watermark autres que les racines, en l'occurrence le drainage ou l'évaporation dans l'atmosphère, mais cette variation est négligeable par rapport aux variations dues à l'activité racinaire (Tron, 2013).

Le NPA est corrélé aux avis donnés par des professionnels sur la reprise des arbres. Il y a plus d'activités racinaire aux sujets qui ont attribué la note 2 c'est à dire "bonne reprise", contrairement aux autres qui ont une mauvaise reprise. Les résultats révèlent aussi que l'année est un facteur important dans la reprise c'est à dire un arbre transplanté sur un site ne déploie ses racines qu'à partir de la deuxième année suivant la transplantation (Krieter et Malkus, 1996). C'est pour cette raison que la reprise racinaire des arbres en première année n'est évaluée que dans la motte, ensuite la motte et le sol de plantation à partir de la deuxième année. Ainsi, le nombre de périodes d'activités par an peut déterminer la reprise ou pas d'un arbre. L'évaluation du début et de la fin de chaque période d'activité racinaire peut permettre au gestionnaire d'anticiper et de maîtriser les besoins en eau de l'arbre pendant la saison de reprise dont le succès en dépend énormément. Nos résultats peuvent ainsi aider les professionnelles à mieux gérer les arbres urbains, mais il est nécessaire d'effectuer davantage de travaux sur les arbres transplantés dans les zones urbaines pour comprendre la croissance initiale des arbres après la transplantation. Initiée depuis les années 90 en France, la détermination des outils et méthodes de suivi des arbres urbains doit être beaucoup plus appréhender à l'échelle des habitations, des quartiers ou des villes et pouvoir chiffrer les services écosystémiques rendus

comme l'impact du pouvoir rafraîchissant des différentes espèces dans la lutte contre le réchauffement climatique (Boutefeu, 2011 ; De Munck, 2013 ; Selmi, 2016).

Conclusion

Contrairement à la production agricole où plusieurs recherches et actions ont été menées pour conduire et piloter les besoins hydriques des végétaux vers une utilisation efficiente de l'eau tout en assurant une bonne production, les espaces verts manquent cruellement d'études dans ce sens du fait de la variabilité élevée liée aux végétaux urbains et de leurs environnements. Néanmoins, ces dernières années des efforts remarquables ont été faits pour améliorer la conduite de l'arrosage des espaces verts notamment les arbres dans le but de pérennité des plantations à travers la méthode de suivi tensiométrique.

L'utilisation de cette méthode dans cette étude pour déterminer l'activité racinaire des arbres urbains afin d'évaluer et anticiper la reprise des arbres après transplantation nous a permis d'avoir des résultats prometteurs malgré le nombre de facteurs importants qui peuvent influencer cette activité. Dans une perspective à court terme, des mesures de l'état hydrique du sol et de l'arbre combinées, pourront être importantes pour déterminer des meilleurs indicateurs de l'activité racinaire et de l'arbre de façon générale afin de pouvoir prédire le succès de transplantation des arbres urbains.

Chapitre 5 : Construction d'un Outil d'Aide à la Prise de Décision : Application à l'irrigation déficitaire des végétaux en ville.

Introduction

Dans le monde complexe de l'aide à la décision, les modèles jouent un rôle crucial en fournissant des bases scientifiques et en aidant à comprendre le fonctionnement général des systèmes. Ils sont utilisés pour analyser et prédire des phénomènes complexes afin d'intervenir dans la prise de décision dans un large éventail de domaines. Plusieurs approches sont employées pour modéliser ces phénomènes telle que l'approche mécaniste permettant d'étudier des phénomènes qui ne sont pas facilement observables dans la réalité, ou d'explorer le comportement du système même dans des situations extrêmes (Baker et al., 2018). Des équations mathématiques sont utilisées dans cette approche pour décrire les interactions entre les différentes composantes du système complexe (Fister, 2004; X.-S. Yang, 2017). Une autre approche, dite statistique est utilisée aussi. À l'ère actuelle, indéniablement caractérisée par une explosion de données, cette approche a beaucoup évolué, pour répondre aux défis posés par la disponibilité croissante de ces données multiples et complexes. Des modèles statistiques tels que la régression multiple ou les méthodes d'apprentissage automatique comme les arbres de décisions ou plus complexes comme les réseaux de neurones sont utilisées pour analyser et prédire des phénomènes complexes afin de contribuer à la prise de décision dans plusieurs domaines (Krause, 2008; Devlin & Magill, 2006; Chlingaryan et al., 2018; Romanovska et al., 2023; Wilkin et al., 2023).

Dans le domaine de l'irrigation, les modèles biophysiques sont utilisés pour optimiser les pratiques en fonction des conditions climatiques, de la demande en eau des végétaux, des caractéristiques du sol et d'autres paramètres techniques, afin de privilégier une utilisation efficiente de l'eau (Dubois et al., 2021; Gao et al., 2023). Ainsi, pléthore de modèles existent (Brisson, 2009; Cheviron et al., 2016; Šimůnek et al., 2016; J.-C. Mailhol et al., 2018; Dubois et al., 2021; Hamze et al., 2023; Lazarovitch et al., 2023) à destination de l'irrigation, mais ces modèles sont souvent difficilement malléables, interprétables et adaptables, si bien qu'ils se restreignent à la question scientifique de départ et ferment souvent la porte à toute possibilité de réutilisation (Gao et al., 2023) surtout dans le monde professionnel. Il faut comprendre ainsi que le concept d'aide à la décision reste peu présent dans le processus de modélisation, même si son développement est une volonté affichée (Car, 2018). S'il existe plusieurs méthodes de modélisation de phénomènes réels ; peu, voire aucune d'entre elles, s'achèvent par la construction d'un véritable outil d'aide à la prise de décision. Un modèle n'est pas un outil d'aide à la prise de décision.

Les modèles restent indispensables pour comprendre le système, cependant, la réalité opérationnelle ne se limite pas toujours à ce que les modèles scientifiques peuvent fournir comme informations pour prendre des décisions d'irrigations. Par exemple, en milieu urbain, les gestionnaires des végétaux font face à un ensemble de défis pratiques qui ne sont pas souvent pris en compte par les modèles tels que les contraintes réglementaires et même les attentes des citoyens ou des élus en matière d'environnement urbain. Ces paramètres ne sont pas pris en compte dans les modèles biophysiques qui ont une portée plus étroite des critères que les gestionnaires utilisent réellement pour prendre des décisions, leurs apports ont donc une valeur limitée (Car, 2018).

Dans cette situation, l'outil d'aide à la prise de décision proposé doit, certes, s'appuyer sur des modèles scientifiques, mais également tenir compte de toute une gamme de paramètres pratiques qui déterminent la réalité opérationnelle. Il est important de reconnaître que ces modèles, bien que puissants, ne représentent qu'une facette de la complexité de la prise de décision. Plusieurs verrous scientifiques restent à résoudre pour structurer le processus de modélisation permettant d'aboutir à la construction de véritables outils d'aide à la prise décision (OAPD). Dans cette étude nous allons répondre à quelques questions : Qu'est-ce qu'un outil d'aide à la prise de décision (OAPD) ? Comment prendre compte des individus d'environnements différents dans un processus de prises de décisions ? Quel est le rôle de la donnée (d'où qu'elle vient) dans un OAPD ? Mieux qualifier les concepts et proposer une méthode permettant de construire un OAPD à l'irrigation des végétaux en ville devient une nécessité. Pour trouver de meilleurs moyens de modéliser les décisions du monde réel, nous suggérerons, en plus des modèles biophysiques, de tenir compte de l'utilisation de la théorie de la décision et les techniques de modélisations de décisions pour mettre en place un OAPD.

1 Outil d'aide à la prise de décision (OAPD)

Un outil d'aide à la prise de décision est composé de plusieurs éléments essentiels qui interagissent pour faciliter le processus de prise de décision. Avant de parler de l'outil, nous allons faire un petit rappel sur quelques concepts qui sont la décision, l'aide à la prise de décision et la théorie de la décision. Une décision implique qu'un acteur ou un groupe d'acteurs choisissent parmi plusieurs solutions pour résoudre un problème donné. La prise de décision peut être étudiée en examinant les processus qui conduisent un choix de décision (Roy, 1993). Ce processus est étudié par la théorie de la décision qui vise à comprendre comment les individus et les organisations prennent des choix parfois face à des situations complexes et

incertaines. Elle propose des modèles et des méthodes pour évaluer les options disponibles, comparer les coûts et les avantages et identifier la meilleure décision possible en fonction des objectifs et des contraintes (Kast, 1993; Bouyssou et al., 2015). Cette théorie repose sur l'idée que les décideurs cherchent à atteindre certains objectifs ou à maximiser leur satisfaction, leur profit ou leur utilité. Cependant, les décisions sont souvent confrontées à des paramètres qui ne sont pas contrôlés par le décideur. La théorie de la décision cherche à modéliser ces éléments pour mieux comprendre comment les décisions sont prises dans la réalité (Tsoukiàs et al., 2010).

Dans cette partie nous détaillerons les éléments qui constituent un outil d'aide à la prise de décision (OAPD). Nous proposerons une définition d'un OAPD qui englobe l'utilisation de modèles de décision, d'ontologies pour la représentation des connaissances et la prise en compte des acteurs tout au long du processus de prise de décision.

1.1 Elicitation du processus de décision

Le processus de décision dans un OAPD décrit dans la Figure 5. 1 consiste, d'abord, à intégrer les résultats des modèles, par exemple, les modèles et/ou données de systèmes complexes puis identifier et évaluer les différents scénarios cohérents proposés et enfin procéder à la prise de décision. Les scénarios proposés lors du processus de décision sont mis en forme dans un modèle qui utilise l'ontologie pour représenter les connaissances du domaine et faciliter la compréhension entre les acteurs. Les scénarios mis en forme seront proposés au décideur via une interface. L'outil pourrait utiliser l'apprentissage par renforcement pour calibrer le modèle d'intégration. Le processus est détaillé dans les parties suivantes.

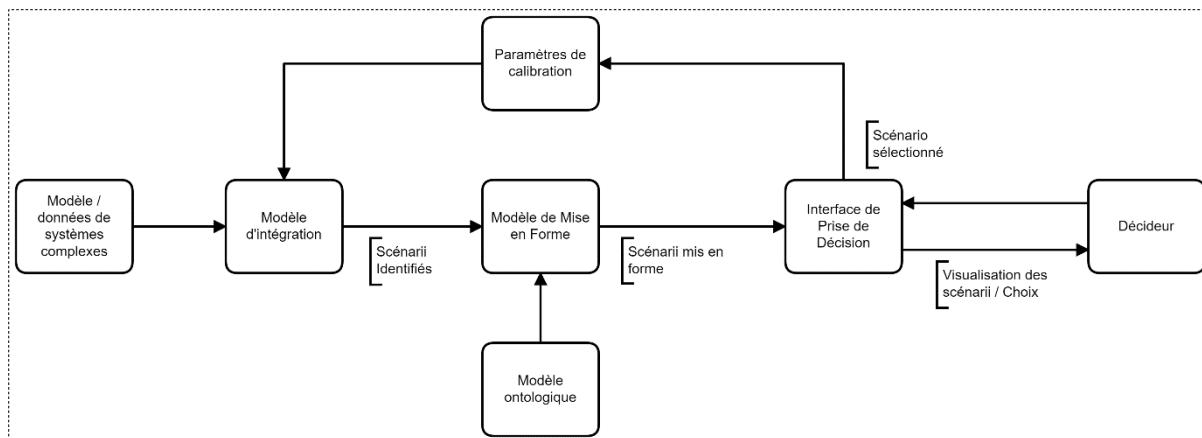


Figure 5. 1 : Proposition d'une architecture pour construire un Outil d'Aide à la Prise de Décision

1.1.1 Production de connaissance via des modèles de systèmes complexes

Dans un Outil d'Aide à la Prise de Décision (OAPD), les modèles représentent une composante essentielle d'un ensemble contribuant et y jouent un rôle central et fondamental. En effet, les modèles de systèmes complexes sont des représentations abstraites et formelles de systèmes réels caractérisés par un grand nombre d'entités interagissant de manière dynamique. Ils sont conçus pour être des outils puissants d'analyse et de synthèse, permettant aux chercheurs, aux décideurs et aux praticiens de mieux appréhender la complexité inhérente aux phénomènes naturels et sociaux (Marilleau, 2016). Ils sont incontournables dans de nombreux domaines, tels que les sciences physiques pour comprendre les systèmes complexes et optimiser les processus industriels (Sercombe et al., 2020; De Smedt et al., 2023), les sciences sociales pour modéliser les choix des populations ou sonder l'opinion publique (Liebe & Meyerhoff, 2021), l'ingénierie (Eicker, 2019), la biologie pour comprendre le fonctionnement de ses systèmes (Merchuk et al., 2011), la météorologie pour pouvoir prédire la météo et les événements de catastrophes naturelles (Zhao & Liu, 2021; Szturc et al., 2022), et bien d'autres domaines.

Ainsi, les résultats de ces modèles permettent aux scientifiques, ingénieurs et décideurs de mieux comprendre les systèmes complexes, d'explorer différentes hypothèses et de tester des scénarios avant de prendre des décisions (Varenne et al., 2018). Il est primordial de savoir que la modélisation simplifie la réalité et qu'elle repose sur des hypothèses et des approximations. Les modèles ne sont pas des copies exactes du monde réel, mais ils permettent de simuler les principaux mécanismes et comportements du système étudié. Dans le domaine opérationnel, l'application de ces modèles peut sembler insuffisante, car la réalité est souvent bien plus complexe que ce que propose uniquement les résultats des modèles comme solutions. Toutefois, la première étape de construction d'un OAPD consiste à utiliser les modèles pour produire de la connaissance en répondant clairement aux questions de départ de l'outil. Ils constituent l'une des composantes essentielles de l'outil et interviennent à plusieurs niveaux pour faciliter le processus de prise de décision. Le processus de modélisation continue et les résultats de ces modèles seront formalisés par des techniques de la modélisation des décisions (Car, 2018) et intégrés dans le modèle d'intégration générale de l'outil.

1.1.2 Identification et évaluation de scénarii intéressants par des techniques de modélisation des décisions

La modélisation de décisions implique la création de représentations formelles du processus de prise de décision, souvent basées sur des données des modèles scientifiques, des critères, des objectifs de décisions et des relations entre différents autres paramètres (Romera et al., 2004;

Flenga & Favvata, 2023; Varga et al., 2023). Ce processus permet de comprendre et d'analyser les différents scénarii disponibles, ainsi que les conséquences potentielles de chaque scénario. Une fois que le modèle de décision est développé, il peut être utilisé pour dériver des règles de décision spécifiques (Davis et al., 2009; Bingham et al., 2019). Ces règles de décision sont formulées pour aider à prendre des décisions dans des situations données. Elles sont souvent basées sur les résultats du modèle et peuvent être utilisées pour automatiser le processus de prise de décision dans certaines applications.

Plusieurs approches permettent de modéliser la décision et élaborer des règles de décision à partir des modèles de systèmes complexes existent telles que les techniques d'apprentissages automatiques (les arbres de décisions, les réseaux bayésiens et les réseaux de neurones) (Gao et al., 2023), l'analyse multicritère (MCA) (Roy, 2016), les systèmes experts (Santos-Gomez & Darnell, 1992), la notation de modèle de décision (DMN) et les ontologies de décisions (Car, 2018).

1.1.3 Prise de décision et la rétroaction

Cette étape marque la fin du processus qui permet au décideur de choisir parmi les scénarii proposés via l'interface. Le décideur peut choisir un scénario en fonction des paramètres opérationnels mais aussi en fonction du contexte. Les scénarii proposés aux décideurs sont argumentés et bien explicités assurant ainsi une meilleure compréhension des décisions.

Les décisions prises par les décideurs pourront être utilisées pour une adaptation continue des prochaines recommandations.

1.2 Représentation des connaissances par l'ontologie

L'utilisation de l'ontologie dans un OAPD permettra de créer une structure sémantique solide pour représenter les éléments du système. Elle peut être utilisée à divers stades du processus de prise de décision, depuis la conception initiale de l'outil jusqu'à son utilisation quotidienne pour améliorer la compréhension du domaine. Elle joue un rôle essentiel dans la représentation formelle des connaissances et des concepts, ce qui contribue à rendre le processus de prise de décision plus transparent et plus efficace (Kornyshova & Deneckère, 2010). Elle fournit des moyens de base pour décrire les scénarii proposés et peut être formalisée dans le langage OWL (Web Ontology Language) (Lohmann et al., 2015). Une nouvelle ontologie peut être construite (Amarger et al., 2014) ou utiliser d'autres ontologies existantes (Nguyen et al., 2020).

1.3 Proposition d'une définition d'un OAPD

La démarche proposée ci-dessus pour mettre en place un OAPD nous mène à proposer une définition de l'OAPD. Ainsi, un outil d'aide à la prise décision est un système ou une application qui intègre des modèles de systèmes complexes aboutissant à des règles de décisions, des ontologies pour la représentation des connaissances et des mécanismes d'interaction avec des acteurs impliqués dans un processus de prise de décision spécifique. Cet outil vise à faciliter la prise de décision en générant des recommandations ou des scénarios basés sur des modèles, en prenant en compte à la fois les données historiques et en temps réel, ainsi que les contraintes et les préférences des acteurs impliqués. Il permet une collaboration entre les acteurs, guide les décisions en proposant des alternatives, et peut être ajusté via l'interface en fonction des retours et des évolutions dans le domaine d'application.

2 Mise en place d'un OAPD pour l'irrigation déficitaire des végétaux en ville par les acteurs des espaces verts : cas Urbasense

La construction de cet outil nous permettra de répondre à deux problématiques de l'irrigation des végétaux en ville que nous mettrons en application : arroser des végétaux pour assurer la survie des arbres nouvellement transplantés (Gilman et al., 2013) mais aussi les arroser durant une canicule pour dans certaines conditions amplifier leur effet rafraîchissant (Cheung et al., 2021).

2.1 Modèles d'irrigation des végétaux urbains existants

Pour illustrer ce point, prenons l'exemple de l'irrigation déficitaire (cf. chapitre 2) des arbres en milieu urbain particulièrement les arbres nouvellement transplantés où plusieurs études ont été faites pour proposer des modèles de prise de décision. En effet, une bonne maîtrise de l'irrigation est essentielle chez les jeunes arbres pour garantir une bonne reprise (Sherman et al., 2016), réduire considérablement le taux de mortalité, assurer les services écosystémiques fournis (Nowak et al., 2018; Drew-Smythe et al., 2023) mais aussi participer à l'effort d'économie de l'eau. Ainsi, les apports d'eau doivent être étudiés sur des bases objectives et non empirique pour aider les professionnels des espaces verts et les collectivités à maîtriser l'irrigation pour des raisons d'éthiques mais aussi budgétaire. En ville, l'irrigation représente une proportion très importante de la gestion des jeunes arbres urbains (Devitt et al., 2008). Dans la plupart des plantations, l'irrigation est complexifiée par l'absence de système d'arrosage intégré. Dans ce cas pour arroser, il faut mobiliser de la main d'œuvre, de la logistique (camion-citerne) et planifier des tournées.

En milieu urbain, les modèles d'irrigation des végétaux sont mis en place pour soit estimer les besoins en eau des végétaux en fonction des facteurs environnementaux et des caractéristiques spécifiques à chaque site ou soit pour utiliser les données de l'humidité du sol et les données météorologiques et ainsi prédire le moment optimal de l'irrigation des végétaux (Litvak et al., 2017; Hartin et al., 2018; Cheng et al., 2023). Ces modèles peuvent être de nature mécaniste, en se basant sur des connaissances scientifiques, sur les processus biologiques et physiologiques des plantes, ou de nature statistique, en utilisant des algorithmes pour apprendre à partir de données passées et prédire les besoins en eau futurs. Les modèles d'estimation des besoins en eau des végétaux (Nouri et al., 2013), se basent dans la plupart des cas, sur le calcul l'évapotranspiration (Allen et al., 2011). Contrairement au milieu agricole, les espaces verts urbains présentent une grande variabilité en termes de conditions édaphiques et climatiques, de types de végétation, densités et superficies, ce qui complexifie la mesure précise de l'évapotranspiration (Litvak et al., 2017; Allen et al., 2020; Saher et al., 2021).

Malgré les contraintes en milieu urbain, des études ont été menées pour mettre en place un modèle, pour estimer spécifiquement les besoins en eau des végétaux en ville particulièrement les arbres. C'est le modèle WUCOLS. Il a été conçu dans le but d'accompagner, les collectivités, à la gestion de l'irrigation dans les espaces verts urbains en Californie, aux États-Unis par Costello et al. (2000). Il a été utilisé dans plusieurs études en irrigation des végétaux en ville (Parés-Franzi et al., 2006; Salvador et al., 2011; Hof & Wolf, 2014; Nouri et al., 2016; Padullés Cubino et al., 2017; Hartin et al., 2018; Sojoodi & Mirzaei, 2019; Shojaei et al., 2020; Cheng et al., 2023). Hartin et al (2018), ont utilisé le modèle pour former les gestionnaires des espaces verts sur les besoins réels des espèces étudiées par le modèle WUCOLS pour qu'ils adaptent les apports en eau. Shojaei et al (2021) recommandent la méthode WUCOLS comme méthode précise, complète et pratique afin d'estimer les besoins en eau des plantes paysagères. Et plus récemment, Cheng et al (2023), ont travaillé sur une étude qui vise à estimer les besoins en eau actuels et futurs afin de déterminer les besoins en irrigation des espaces verts à Séoul pendant les périodes de déficit pluviométrique dans les conditions climatiques différentes.

Ces modèles sont largement acceptés en tant qu'outils de référence dans la recherche scientifique, mais leur utilisation sur le terrain reste limitée en raison de leur manque d'adaptabilité et des nombres de paramètres à renseigner pour leur configuration. Par conséquent, il est nécessaire de développer des méthodes plus simples, caractérisées par quelques paramètres clés, même s'ils peuvent atteindre des objectifs de précision moins ambitieux que les modèles complexes mais aider les acteurs dans la prise de décision

opérationnelle pour l'irrigation. Des capteurs de surveillance de l'état hydrique du sol, au plus près des racines sont utilisés pour permettre de piloter efficacement les doses et les fréquences d'arrosage des jeunes arbres urbains. Le modèle développé (TeadXpert) par Urbasense, à partir des données recueillies, répond parfaitement aux attentes spécifiques des gestionnaires des espaces verts (certaines données et processus de ce modèle ne seront pas présentés dans cette thèse). Il permet de mettre en évidence les excès et les manques d'eau dans le sol, de suivre l'état de dessèchement des différents horizons du sol de plantation, d'évaluer l'eau disponible pour les racines et de pouvoir prédire la date et la quantité d'eau à apporter pour réhumecter le sol. En plus de la gestion économe de l'eau d'irrigation que procure cette approche, elle permet aussi d'évaluer l'activité racinaire et par conséquent la réussite de la reprise des arbres nouvellement transplantés (modèle développé dans le chapitre 4).

2.2 Paramètres non modélisables mais indispensables pour la prise de décision à l'irrigation des végétaux en ville

Les modèles biophysiques ont permis de faire des avancées significatives dans la compréhension du comportement hydrique des arbres urbains. Cependant, la réalité opérationnelle ne se limite pas toujours à ce que ces modèles peuvent fournir comme informations pour prendre des décisions d'irrigations. Les gestionnaires font face à un ensemble de défis pratiques qui ne sont pas souvent pris en compte par les modèles tels que la disponibilité limitée de l'eau, les coûts associés à l'irrigation, la disponibilité des équipements d'arrosage ou les attentes des citoyens en matière d'environnement urbain.

Les paramètres non modélisables qui peuvent intervenir dans l'outil d'aide à la prise de décision à l'irrigation des végétaux en ville sont des facteurs ou des contraintes qui ne peuvent pas être directement inclus dans les modèles biophysiques en raison de leur nature complexe, imprévisible ou externe au système modélisé. Ces paramètres peuvent toutefois avoir un impact significatif sur la décision finale d'irrigation. Prenons l'exemple de l'irrigation des arbres urbains nouvellement transplantés, plusieurs aspects peuvent influencer la décision d'irriguer ou pas les arbres. Dans la plupart des projets de plantations d'arbres, les apports en eau durant les trois années suivants la plantation se font avec un système d'irrigation manuel. Lorsqu'il n'y a pas de disponibilité par exemple du camion du fait de manque de ressources disponibles ou de leur utilisation par d'autres secteurs, la décision d'irrigation ne pourra pas être exécutée ou en d'autres situations lorsque des restrictions administratives sur l'utilisation de l'eau pour les végétaux en ville sont prises par les autorités.

2.3 Application à l'irrigation déficitaire des végétaux urbains

Pour construire un outil d'aide à la prise de décision à l'irrigation déficitaire des végétaux en ville, nous utiliserons l'approche décrite ci-dessus afin de proposer une démarche généralisée (Figure 5. 2). Dans un premier temps nous utilisons des modèles de systèmes complexes pour répondre par exemple à la question suivante : “ « arroser » ou « ne pas arroser » ? ”. Dans le cas de cette étude nous disposons d'une base de données de décisions d'arrosage des arbres urbains. En effet, ces décisions sont issues des résultats des modèles de systèmes complexes que nous avons intégrés dans le modèle d'intégration. Il s'agit du modèle TeadXpert qui, à partir des données de la mesure de l'humidité du sol à travers sondes tensiométriques installées au pied de chaque arbre suivi à des profondeurs différentes, calcule la réserve utile aux racines (RUR) et prédit la prochaine date d'arrosage. Un autre modèle que nous avons construit dans le cadre de cette thèse permettant de détecter une activité racinaire et de prédire la reprise d'un arbre après plantation (cf. chapitre 4). En plus, nous utilisons des modèles de prévisions météorologiques (pluie et température) au niveau des sites de plantation. Les décisions, « arroser » ou « ne pas arroser », sont basées d'abord exclusivement sur des paramètres agronomiques. L'arbre de décision a été appliqué pour identifier les règles qui optimisent la décision d'arrosage à dire d'expert à partir de données issues du modèle d'intégration. Cette méthode est présentée dans les paragraphes suivants.

Une représentation des décisions utilisant la théorie de la décision a permis de créer une base de connaissances sur l'irrigation qui peut aider à établir les meilleures pratiques décisionnelles. Ainsi, nous avons procédé à la modélisation des connaissances et des règles de décision de l'irrigation des végétaux en ville de manière formelle et compréhensible. L'utilisation d'une ontologie a été nécessaire pour formaliser les éléments du modèle de décision, de modéliser et structurer les concepts et les relations de décisions d'irrigation de manière formelle. L'objectif est de fournir une sémantique commune pour la prise de décision. Cela signifie que les acteurs impliqués dans la prise de décision, qu'ils soient des experts agronomiques ou des gestionnaires, aient un langage commun pour discuter les décisions.

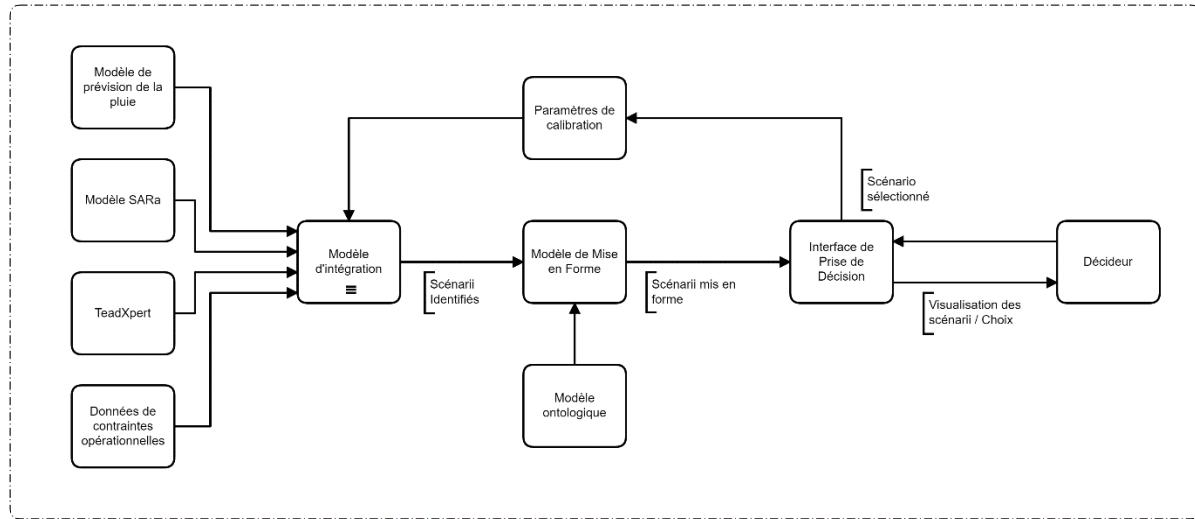


Figure 5. 2 : Architecture de l'OAPD à l'irrigation des végétaux urbains proposé

2.3.1 Détermination et intégration des règles de décisions d'arrosage des arbres urbains à partir du modèle d'intégration

Les règles de décisions ont été déterminées à partir de la traduction des tables de décision. Par exemple, la table (Tableau 5. 1) a été déterminée avec la collaboration des experts agronomes d'Urbasense qui préconisent des décisions d'arrosage des arbres urbains à partir de données brutes issues de capteurs sur le terrain. Cette table présente les trois variables de sorties des modèles SARa et TeadXpert (Tableau 5. 2).

Le modèle SARa a été développé dans le cadre de cette étude et permet d'évaluer l'activité racinaire des arbres urbains et de prédire la reprise. La variable **Reprise** nous renseigne sur l'état de reprise de l'arbre après transplantation. Elle est caractérisée par deux propriétés ; « **Bonne** » si le modèle détecte le nombre de périodes d'activités suffisant pour assurer l'ancre racinaire de l'arbre dans son nouvel environnement et la propriété « **Vigilence** » nous renseigne que l'arbre n'a pas encore totalement repris. La variable **Activité Racinaire** est aussi une variable issue du modèle SARa qui représente l'activité racinaire durant les 30 derniers jours au moment de la prise de décision.

Le modèle TeadXpert nous renseigne sur l'état de l'eau disponible aux racines. La variable « **RUR** » représente la réserve utile aux racines, elle est caractérisée par « **Faible** » ; « **Modérée** » ; « **Elevée** ».

Les décisions s'appliquent aux arbres urbains durant les deux premières années après transplantation.

Tableau 5. 1 : Table des variables de sorties des deux modèles (SARa et TeadXpert)

Modèles / Données	Paramètres	Caractéristiques
SARA	Reprise	« Bonne » ; « Vigilance »
	Activité racinaire (AR)	« OUI » ; « NON »
TeadXpert	Réserve Utile aux racines (RUR)	« Faible » ; « Modérée » ; « Elevée »
Année de suivi	Année	1 ; 2

La table ci-dessous (Tableau 5. 2) permet de déterminer les règles de décisions d'arrosage basées uniquement sur les modèles biophysiques utilisés. Par exemple, la première ligne est traduite comme suit : « Si l'arbre est en première année de plantation, s'il présente une activité racinaire, la réserve d'eau utile aux racines est faible et la reprise est en vigilance il faut arroser ». Par contre la treizième ligne présente les mêmes caractéristiques de variables mais la décision est ne pas arroser. Cela s'explique par le fait que l'arbre est en deuxième année et doit présenter suffisamment de périodes d'activités pouvant lui permettre d'avoir une bonne reprise.

Tableau 5. 2 : Table de décision réalisée avec des experts agronomiques qui préconisent des décisions d'arrosage aux gestionnaires des espaces verts.

N°	Année	AR	RUR	Reprise	Décision
1	1	OUI	Faible	Vigilance	Arroser
2	1	OUI	Modérée	Vigilance	Arroser
3	1	OUI	Forte	Vigilance	NePasArroser
4	1	OUI	Faible	Bonne	Arroser
5	1	OUI	Modérée	Bonne	NePasArroser
6	1	OUI	Forte	Bonne	NePasArroser
7	1	NON	Faible	Vigilance	NePasArroser
8	1	NON	Modérée	Vigilance	NePasArroser
9	1	NON	Forte	Vigilance	NePasArroser
10	1	NON	Faible	Bonne	Arroser
11	1	NON	Modérée	Bonne	NePasArroser
12	1	NON	Forte	Bonne	NePasArroser
13	2	OUI	Faible	Vigilance	NePasArroser
14	2	OUI	Modérée	Vigilance	NePasArroser
15	2	OUI	Forte	Vigilance	NePasArroser
16	2	OUI	Faible	Bonne	Arroser
17	2	OUI	Modérée	Bonne	NePasArroser
18	2	OUI	Forte	Bonne	NePasArroser

19	2	NON	Faible	Vigilance	NePasArroser
20	2	NON	Modérée	Vigilance	NePasArroser
21	2	NON	Forte	Vigilance	NePasArroser
22	2	NON	Faible	Bonne	Arroser
23	2	NON	Modérée	Bonne	NePasArroser
24	2	NON	Forte	Bonne	NePasArroser

Les résultats des deux modèles seuls ne permettent pas de prendre une décision d'arrosage des arbres urbains, il faut s'assurer premièrement que les prochaines pluies ne seront pas suffisantes pour réhumecter le sol (Tableau 5. 3).

Tableau 5. 3 : Table des variables de sorties des deux modèles (SARa et TeadXpert) et de la météo (pluie)

Modèles / Données	Paramètres	Caractéristiques
SARa	Reprise	« Bonne » ; « Vigilance »
	Activité racinaire (AR)	« OUI » ; « NON »
TeadXpert	Réserve Utile aux racines (RUR)	« Faible » ; « Modérée » ; « Elevée »
Année de suivi	Année	1 ; 2
Météo	Pluie	« Suffisante » ; « Insuffisante »

En milieu urbain, la pluie peut permettre de réhumecter le sol et apporter les besoins nécessaires en eau aux arbres. Le cumul de pluie en mm nécessaire pour réhumecter le sol a été évalué en collaboration des experts agronomique.

Tableau 5. 4 : Table de décision réalisée avec des experts agronomiques intégrant le modèle météo (pluie)

N°	Année	AR	RUR	Reprise	Pluie	Décision
1	1	OUI	Faible	Vigilance	Suffisante	NePasArroser
2	1	OUI	Modérée	Vigilance	Suffisante	NePasArroser
4	1	OUI	Faible	Bonne	Suffisante	NePasArroser
10	1	NON	Faible	Bonne	Suffisante	NePasArroser
16	2	OUI	Faible	Bonne	Suffisante	NePasArroser
22	2	NON	Faible	Bonne	Suffisante	NePasArroser
23	1	OUI	Faible	Vigilance	Insuffisante	Arroser
24	1	OUI	Modérée	Vigilance	Insuffisante	Arroser

25	1	OUI	Faible	Bonne	Insuffisante	Arroser
26	1	NON	Faible	Bonne	Insuffisante	Arroser
27	2	OUI	Faible	Bonne	Insuffisante	Arroser
28	2	NON	Faible	Bonne	Insuffisante	Arroser

Comme nous l'avons expliqué dans 2.2, des paramètres autres que ceux fournis par les modèles complexes considérés comme des données de contraintes opérationnelles peuvent influencer la décision d'arrosage en milieu urbain. Dans le cas de cette étude nous avons utilisé un paramètre, disponibilité de l'eau avec les caractéristiques « Restriction » et « PasRestriction ».

Tableau 5. 5 : Table des variables de sorties des deux modèles (SARA et TeadXpert), de la météo (pluie) et des données de contraintes opérationnelles.

Modèles / Données	Paramètres	Caractéristiques
SARA	Reprise	« Bonne » ; « Vigilance »
	Activité racinaire (AR)	« OUI » ; « NON »
TeadXpert	Réserve Utile aux racines (RUR)	« Faible » ; « Modérée » ; « Elevée »
Année de suivi	Année	1 ; 2
Météo	Pluie	« Suffisante » ; « Insuffisante »
Données Contraintes Opérationnelles	Disponibilité de l'eau	« Restriction » ; « PasRestriction »

Lorsque le cumul des pluies est insuffisant pour réhumecter le sol, un arrosage est demandé. Toutes fois, il faut s'assurer qu'il y a de restrictions administratives sur l'arrosage des espaces verts dans cette zone. S'il y a des restrictions ou de probables restrictions à venir il faut ajuster la décision.

Tableau 5. 6 : Table de décision réalisée avec des experts agronomiques intégrant le modèle météo (pluie) et des paramètres de contraintes opérationnelles

N°	Année	AR	RUR	Reprise	Pluie	Disponibilité de l'eau	Décision
23	1	OUI	Faible	Vigilance	Insuffisante	Restriction	NepasArroser
24	1	OUI	Modérée	Vigilance	Insuffisante	Restriction	NepasArroser

Chapitre 5 : Construction d'un Outil d'Aide à la Prise de Décision : Application à l'irrigation déficitaire des végétaux en ville

25	1	OUI	Faible	Bonne	Insuffisante	Restriction	NepasArroser
26	1	NON	Faible	Bonne	Insuffisante	Restriction	NepasArroser
27	2	OUI	Faible	Bonne	Insuffisante	Restriction	NepasArroser
28	2	NON	Faible	Bonne	Insuffisante	Restriction	NepasArroser
29	1	OUI	Faible	Vigilance	Insuffisante	PasRestriction	Arroser
30	1	OUI	Modérée	Vigilance	Insuffisante	PasRestriction	Arroser
31	1	OUI	Faible	Bonne	Insuffisante	PasRestriction	Arroser
32	1	NON	Faible	Bonne	Insuffisante	PasRestriction	Arroser
33	2	OUI	Faible	Bonne	Insuffisante	PasRestriction	Arroser
34	2	NON	Faible	Bonne	Insuffisante	PasRestriction	Arroser

Il faut noter qu'en milieu, de moult paramètres de contraintes opérationnelles peuvent influencer la décision d'arroser des végétaux.

Les règles de décision ont été affinées et ajustées en collaboration avec des experts en agronomie et en gestion des espaces verts urbains. Leur expertise a permis d'améliorer la pertinence et l'efficacité des règles.

Tableau 5. 7 : Jeu de données utilisées pour réaliser l'arbre de décision (extrait des 37000 lignes du jeu de données utilisé)

Chapitre 5 : Construction d'un Outil d'Aide à la Prise de Décision : Application à l'irrigation déficitaire des végétaux en ville

date_pag	genre	Année	Activite_Racinaire	Reprise	RUR	cumul_pluie	Decision
2022-03-07	PIC	2	Non	Vigilence	Forte	Insuffisante	NePasArroser
2022-03-07	CYD	2	Non	Vigilence	Forte	Suffisante	NePasArroser
2022-03-14	AME	2	Non	Vigilence	Forte	Insuffisante	NePasArroser
2022-03-14	NYS	2	Non	Vigilence	Forte	Insuffisante	NePasArroser
2022-03-15	OST	2	Non	Vigilence	Forte	Insuffisante	NePasArroser
2022-03-16	PTE	2	Non	Bonne	Forte	Insuffisante	NePasArroser
2022-04-04	SOR	2	Non	Bonne	Forte	Suffisante	NePasArroser
2022-04-04	CUP	2	Non	Vigilence	Forte	Suffisante	NePasArroser
2022-05-09	TIL	2	Non	Bonne	Forte	Suffisante	NePasArroser
2022-05-12	FRA	2	Non	Vigilence	Forte	Suffisante	NePasArroser
2022-05-12	GLE	2	Oui	Bonne	Forte	Suffisante	NePasArroser
2022-05-12	AES	2	Oui	Vigilence	Modere	Suffisante	NePasArroser
2022-05-12	MAL	2	Oui	Vigilence	Faible	Suffisante	NePasArroser
2022-06-13	CRY	1	Oui	Vigilence	Modere	Insuffisante	Arroser
2022-06-15	EUO	2	Oui	Bonne	Forte	Suffisante	NePasArroser
2022-06-21	SAL	1	Oui	Vigilence	Modere	Suffisante	NePasArroser
2022-06-28	LAR	1	Non	Vigilence	Forte	Suffisante	NePasArroser
2022-06-29	GYM	2	Oui	Vigilence	Modere	Suffisante	NePasArroser
2022-06-29	KOE	2	Oui	Bonne	Modere	Suffisante	NePasArroser
2022-06-29	MAG	1	Oui	Vigilence	Forte	Suffisante	NePasArroser
2022-06-29	SAS	2	Non	Vigilence	Forte	Insuffisante	NePasArroser
2022-07-06	MEL	2	Oui	Vigilence	Forte	Insuffisante	NePasArroser
2022-08-02	HEP	2	Non	Bonne	Forte	Insuffisante	NePasArroser
2022-08-03	CAT	1	Non	Bonne	Forte	Insuffisante	NePasArroser
2022-08-11	POP	1	Non	Vigilence	Faible	Insuffisante	NePasArroser
2022-08-24	ABI	1	Oui	Bonne	Forte	Insuffisante	NePasArroser
2022-09-05	COR	2	Non	Bonne	Forte	Insuffisante	NePasArroser
2022-09-05	ALB	2	Oui	Vigilence	Forte	Insuffisante	NePasArroser
2022-09-05	MOR	2	Non	Vigilence	Forte	Insuffisante	NePasArroser
2022-09-05		2	Oui	Vigilence	Forte	Insuffisante	NePasArroser
2022-09-29	ILc	2	Oui	Bonne	Forte	Insuffisante	NePasArroser
2022-10-03	LIG	2	Oui	Bonne	Forte	Insuffisante	NePasArroser

2.3.2 Technique d'apprentissage pour automatiser les décisions d'arrosages

L'arbre de décision a été construit pour automatiser les règles de décisions. Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé un jeu de données comprenant 37000 lignes (Tableau 5. 7) de sorties des modèles (TeadXpert, SARa et Météo) pour réaliser l'arbre de décision. L'une des questions cruciales lors de la construction de l'arbre de décision est de déterminer par quelle

caractéristique commencer. En d'autres termes, quelle caractéristique a le plus d'influence sur la décision d'irrigation ? Pour répondre à cette question, nous avons calculé le gain d'information associé à chaque caractéristique possible. Le gain d'information mesure la réduction d'incertitude (d'entropie) que l'ajout d'une caractéristique apporte au processus de décision.

Par exemple, nous avons calculé le gain d'information (à partir de R) de caractéristiques telles que la réserve utile aux racines, l'activité racinaire, la reprise, le cumul de pluie et l'année de plantation. Le calcul du gain d'information nous a permis de classer ces caractéristiques en fonction de leur capacité à réduire l'incertitude de la décision d'irrigation.

Calcul de l'entropie :

$$E(S) = -p_1 \log_2(p_1) - p_2 \log_2(p_2) - \cdots - p_k \log_2(p_k)$$

Où :

- $E(S)$ est l'entropie de l'ensemble de données.
- k est le nombre de classes
- p_1, p_2, \dots, p_k sont les proportions d'exemples de chaque classe dans l'ensemble de données

Tableau 5. 8 : Gain d'information de chaque caractéristique

Caractéristiques	Gain d'information
Réserve Utile aux Racines	681.6863
Cumul de pluie	550.4983
Reprise	514.1156
Activite Racinaire	450.4325
Annee de plantation	416.6175

Les résultats de gain d'information (Tableau 5. 8) ont révélé que la réserve utile du sol est la caractéristique ayant le gain d'information le plus élevé, indiquant qu'elle joue un rôle prépondérant dans la prise de décision. En conséquence, l'arbre de décision commence par évaluer la réserve utile du sol avant de considérer d'autres caractéristiques.

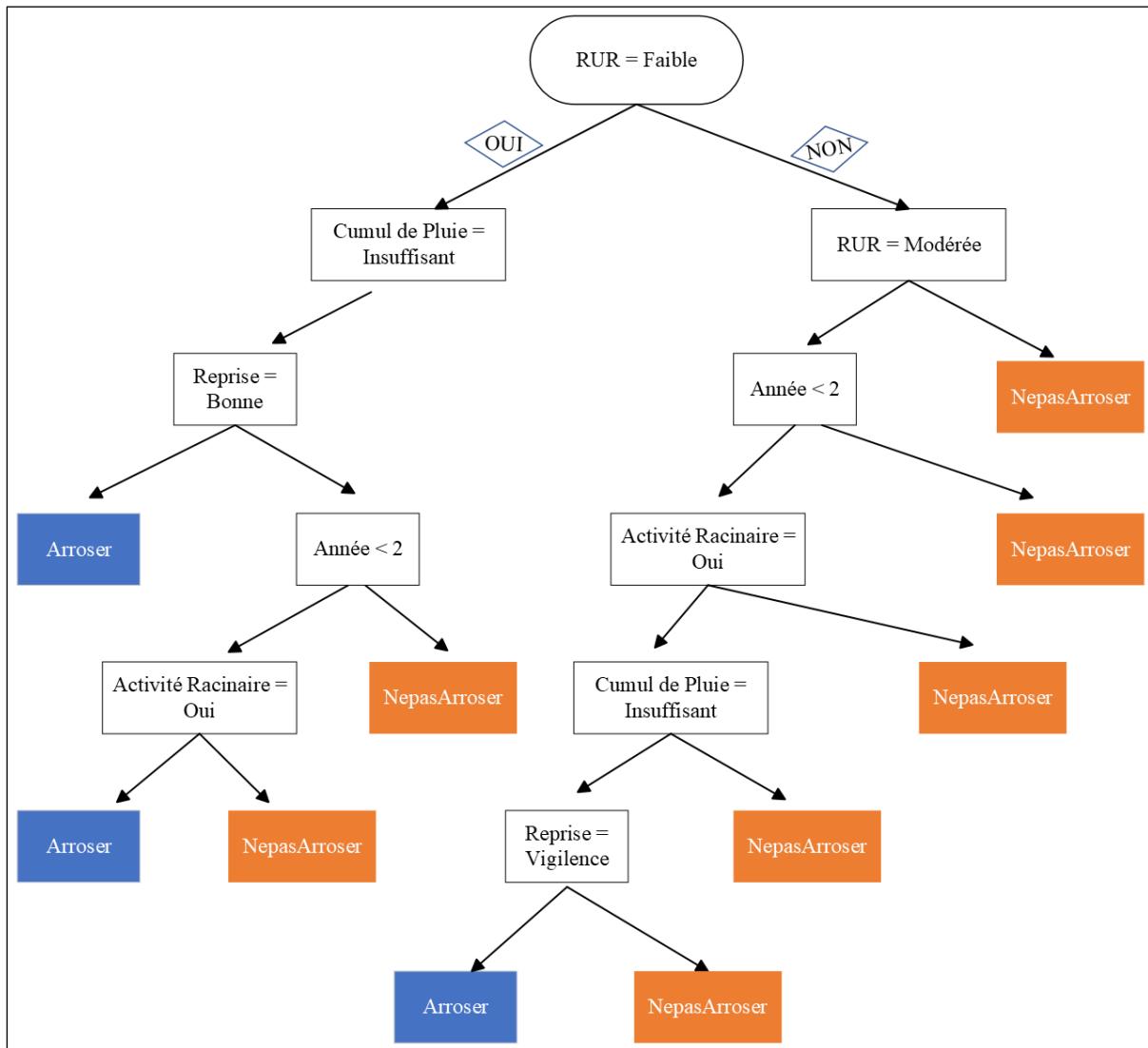


Figure 5. 3 : Arbre de décision à l'irrigation déficitaire des arbres urbains

2.3.3 Construction d'une ontologie de l'irrigation déficitaire des végétaux en ville

Dans le cadre de cette étude, l'ontologie vise à modéliser les connaissances sur le domaine de l'irrigation des végétaux en ville et les acteurs du domaine. L'ontologie représentera le vocabulaire conceptuel commun aux acteurs des espaces verts en ville, et sera utilisée dans le personnel virtuel et pour la recherche d'informations. Le processus de construction de cette ontologie vise à mettre d'abord en place un vocabulaire commun qui facilite l'organisation et l'harmonisation du domaine de l'irrigation des végétaux en ville mais la compréhension des termes utilisés par tous les acteurs. Ainsi, pour identifier les concepts, les propriétés, les relations entre les concepts et les règles liés à l'irrigation déficitaire des arbres urbains, nous nous appuyons sur des éléments de textes de sources diversifiées liés à l'irrigation : des conseils faits par des experts de l'irrigation en ville sous forme de mails, d'enquêtes avec certains acteurs du domaine, des articles traitant les questions de l'irrigation et de marchés publics

d'irrigations. Des outils d'analyses de textes sont utilisés pour repérer et extraire des concepts et leur relation dans les textes.

Une ontologie est toujours liée à une méthode de construction, à un outil de construction et avec un langage de représentation d'ontologie.

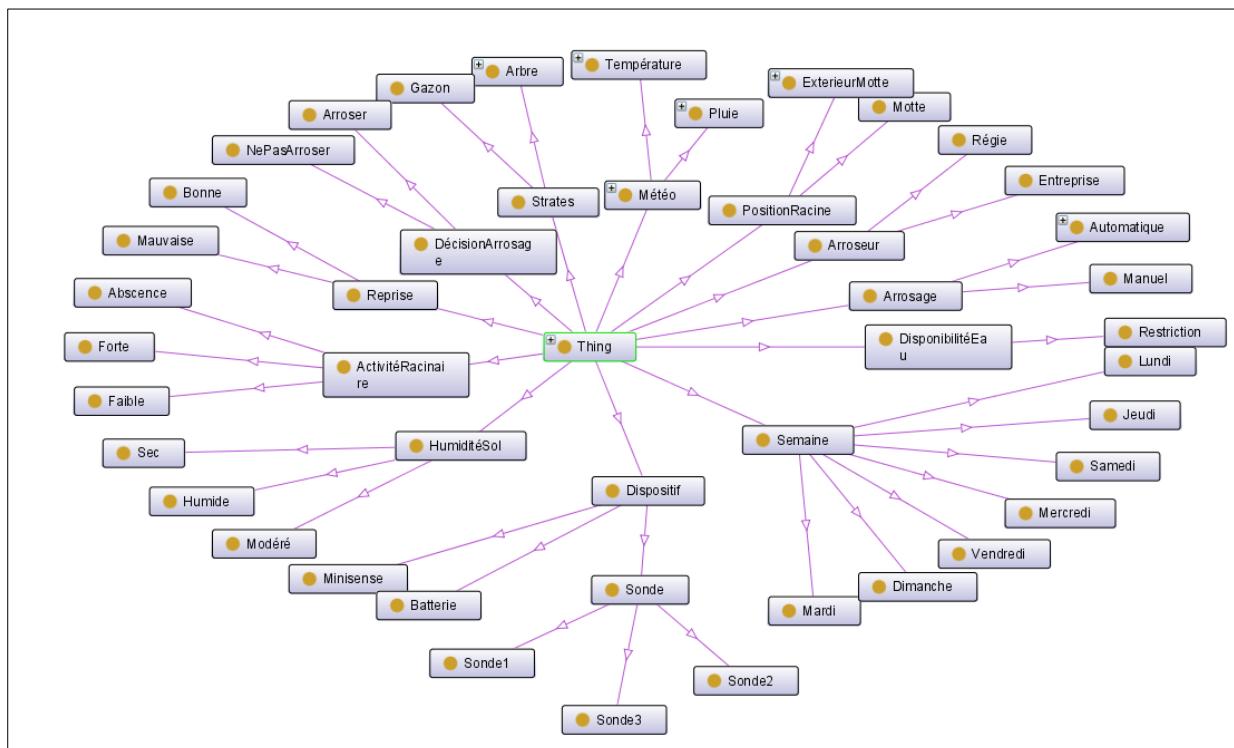


Figure 5. 4 : représentation de différents concepts utilisés dans la construction de l'ontologie de l'irrigation des végétaux en ville

2.3.4 Intégration des jeux d'acteurs

La clé de la réussite de cette approche réside également dans l'implication des acteurs pertinents à chaque étape du processus de décision. Les gestionnaires des espaces verts peuvent contribuer en fournissant des informations sur le terrain, les experts en agronomie peuvent apporter leur expertise technique, les autorités municipales peuvent partager des données sur les ressources en eau disponibles et les équipes d'entretien sont responsables de la mise en œuvre des décisions prises.

Tableau 5. 9 : Les acteurs de l'irrigation des végétaux en ville et leur environnement de décision

Acteurs	Environnement
Pouvoirs publics	Décide de l'infrastructure verte
Scientifiques (chercheur agronome, informaticien, géographe, géologue, juriste...)	Expertise/Étude

Bureau d'études	Conception planification / conseils de l'infrastructure verte
Agence d'expertise (Ingénieur, technicien...)	Suivi de l'infrastructure verte / Décideur
Gestionnaire des espaces publics	Utiliser une infrastructure verte pour réaliser le service / Décideur
Ouvriers	Application
Citoyens	Application / Bénéficiaires

L'application de l'ontologie en situation réelle auprès des acteurs de l'arrosage en ville nécessitera plusieurs adaptations. En effet il sera important d'adapter les concepts et termes utilisés pour correspondre aux besoins et au niveau de compréhension de chaque acteur. Les scenarii proposés par l'OAPD doivent être ajustés à chaque contexte décisionnel pour être utilisables dans un contexte opérationnel.

Conclusion

Dans cette étude, nous nous éloignons de la conception explicite des modèles et de la gestion des données pertinentes pour les modèles d'irrigation pour passer en revue l'état de l'art des systèmes formalisés pour la modélisation des décisions elles-mêmes. Nous faisons cela parce que nous pensons que de nombreux outils d'aide à la décision à l'irrigation qui ont été construits, n'ont pas exploité une bonne connaissance de la manière dont les décisions sont réellement prises, ce qui est la théorie de la décision. Ce chapitre a pour ambition de mettre en place un outil pour la construction d'aide à la décision répondant à un besoin crucial dans la gestion des espaces verts en milieu urbain. Nous avons développé un outil d'aide à la prise de décision intégrant des modèles biophysiques, des données de contraintes opérationnelles utilisés dans un arbre de décision pour répondre à la question d'arroser ou ne pas arroser les végétaux en ville. L'utilisation d'une ontologie a été débutée pour apporter des solutions plus efficaces et éclairées aux gestionnaires de végétaux en ville.

L'objectif est d'accompagner les acteurs des espaces verts à prendre des décisions à l'irrigation déficitaire des végétaux en ville tout en prenant en compte tous les paramètres pouvant influencer la décision d'irriguer ou pas les végétaux. Les résultats ont montré que notre approche, basée sur la modélisation et la formalisation des connaissances expertes, peut contribuer de manière significative à l'amélioration des pratiques d'irrigation. Toutefois, nous avons montré que les modèles biophysiques sont importants mais ils ne sont pas suffisants pour

fournir des décisions éclairées pour l'irrigation. La théorie de la décision est à prendre en compte dans le processus de construction des systèmes d'aide à la décision.

Conclusion Générale & Perspectives

Conclusion Générale & Perspectives

Conclusion générale

La modélisation et l'aide à la prise de décision

Cette étude met en exergue l'importance de la modélisation et des outils de décision dans la gestion des processus de décision complexes. La prise de décision implique la sélection de solutions parmi plusieurs options, souvent face à des situations incertaines et complexes. La théorie de la décision offre des modèles et des méthodes pour évaluer ces options en fonction des objectifs et des contraintes. Ainsi, un outil d'aide à la prise de décision (OAPD) est un système qui intègre des modèles de systèmes complexes, des ontologies pour la représentation des connaissances et des mécanismes d'interaction avec les acteurs impliqués dans le processus de décision. Il vise à faciliter la prise de décision en générant des recommandations basées sur des modèles, en prenant en compte les données historiques, les contraintes et les préférences des acteurs. Le processus de décision dans un OAPD commence par la production de connaissance à partir de modèles de systèmes complexes, qui simplifient la réalité pour en extraire des informations utiles. Les modèles jouent un rôle central dans la compréhension des systèmes complexes et dans l'exploration de différents scénarii.

La modélisation de décisions implique la création de représentations formelles du processus de prise de décision, souvent basées sur des données de modèles scientifiques, des critères, des objectifs de décisions et des relations entre différents paramètres. Cette étape permet de comprendre et d'analyser les différents scénarii disponibles, ainsi que les conséquences potentielles de chaque scénario. Ainsi, la prise de décision marque la fin du processus, où le décideur choisit parmi les scénarii proposés en fonction des paramètres opérationnels et du contexte. Les décisions prises peuvent être utilisées pour adapter les recommandations futures. L'utilisation de l'ontologie dans l'OAPD joue un rôle crucial dans la représentation des connaissances, contribuant à la transparence et à l'efficacité du processus de prise de décision. Les ontologies fournissent une structure sémantique solide pour décrire les éléments du système, facilitant ainsi la compréhension du domaine.

Les OAPD sont des outils puissants pour gérer des processus de prise de décision complexes, en combinant des modèles de systèmes complexes, des ontologies et des mécanismes d'interaction pour faciliter la collaboration entre les acteurs et guider les décisions. Nous proposons une architecture que nous avons appliquée à l'irrigation déficiente.

Conclusion Générale & Perspectives

Application à l'irrigation déficitaire des végétaux en ville

Les végétaux en milieu urbain, autrefois considérés principalement comme une simple décoration urbaine, les végétaux en ville sont désormais reconnus comme des éléments essentiels des écosystèmes urbains, offrant une multitude de services à l'Homme et à l'environnement. Cependant, les végétaux et les services fournis ont un coût notamment en termes d'usage d'eau. D'où l'importance de la gestion efficiente de l'eau d'irrigation dans le contexte de changement climatique où l'eau devient davantage rare. L'application de l'irrigation déficitaire a été proposée dans cette étude pour contribuer à la résilience des végétaux en ville en soumettant les plantes à un stress hydrique modéré et contrôlé. Autres défis à prendre en compte, pour la préservation des services fournis, sont la croissance restreinte, le déclin et la mortalité précoce des végétaux particulièrement des arbres en ville. En effet, ils sont souvent soumis à des conditions de croissance difficile et pour éviter toute perte d'arbres nouvellement plantés un bon suivi est primordial pour assurer la reprise souvent exigée par les entrepreneurs et promis par les pépinières.

Dans le cadre de cette étude nous avons développé un modèle agronomique (SARa) qui permet de qualifier l'activité racinaire des arbres à partir de mesures tensiométriques et évaluer leur reprise tout en tenant compte de facteurs environnementaux. Cette démarche proactive répond à une demande des gestionnaires des espaces verts des collectivités ou les entreprises de paysage qui font souvent recours à des méthodes usuelles (la survie après transplantation ou la croissance du végétal constatée, par exemple, au niveau des pousses, des feuilles, du tronc ou des tiges) qui requièrent un suivi long de la croissance (sur plusieurs saisons). Elles donnent lieu à des résultats ponctuels et tardifs pour qualifier une reprise. Le modèle SARa développé a permis de suivre en continu un arbre pour pouvoir évaluer et anticiper sa reprise au lieu de la constater, à postériori, après quelques années. Les paramètres développés (activité racinaire et reprise) dans le modèle SARa ont été utilisés dans la construction de l'outil d'aide à la prise de décision à l'irrigation.

En effet, cette thèse CIFRE a été réalisée au sein d'une entreprise qui propose des services aux collectivités pour prendre des décisions concernant la gestion et l'entretien des espaces verts urbains mais aussi pour une utilisation efficiente des ressources en eau. Ce projet a montré que les modèles scientifiques, tels que les modèles biophysiques, peuvent être des outils puissants pour comprendre le végétal en ville et leurs besoins en eau. Cependant, il est devenu évident que ces modèles seuls ne sont pas suffisants pour prendre des décisions éclairées en matière d'irrigation urbaine. La réalité opérationnelle, marquée par des contraintes réglementaires, des

Conclusion Générale & Perspectives

attentes citoyennes et des défis pratiques, sont pleinement pris en compte dans l'aide à la décision.

La première étape de construction de l'outil d'aide à la prise de décision que nous avons proposé consistait à utiliser les modèles scientifiques pour répondre clairement aux questions de départ. Ils constituent l'une des composantes essentielles de l'outil et interviennent à plusieurs niveaux pour faciliter le processus de prise de décision. Il s'agit du modèle SARa qui nous a permis de connaitre l'activité racinaire de l'arbre ainsi de savoir si la reprise de l'arbre est effective ou pas. Nous avons utilisé le modèle TeadExpert développé par l'entreprise qui fournit des données sur plusieurs paramètres par exemple la réserve utile aux racines (RUR). En plus, nous avons utilisé des modèles de prévisions météorologiques pour récupérer les données de prévisions de pluie et de la température spécifiques à chaque site de plantation. Les décisions, « arroser » ou « ne pas arroser », sont basées d'abord exclusivement sur des paramètres agronomiques mais elles sont souvent influencées par des données de contraintes opérationnelles. Une méthode statistique d'apprentissage automatique, telle que l'arbre de décision, a été appliquée sur des données historiques de décisions d'arrosage pour formaliser les règles de décision qui ont été déduites avec les experts de l'arrosage des végétaux en ville permettant d'optimiser la prédiction des résultats d'arrosage.

Nous avons également souligné l'importance de la théorie de la décision pour formaliser le processus de prise de décision. Plusieurs méthodes de modélisation de décisions sont disponibles et peuvent être adaptées aux besoins spécifiques de la gestion de l'irrigation en milieu urbain. Une représentation des décisions utilisant la théorie de la décision a permis de créer une base de connaissances sur l'irrigation qui peut aider à établir les meilleures pratiques décisionnelles. L'utilisation d'une ontologie a été nécessaire pour représenter les éléments du modèle de décision. L'ontologie a été identifiée comme un élément essentiel de ce projet. Elle a permis de formaliser les connaissances, de créer un langage commun entre les experts et les gestionnaires de végétaux en ville, et de faciliter la compréhension et la communication. Cependant, sa construction n'a pas abouti dans cette thèse mais fait partie de l'une des perspectives à accomplir à court terme.

L'intégration des approches mécanistes et statistiques dans l'aide à la décision permet d'obtenir un modèle plus complet et robuste pour l'irrigation des végétaux en ville. L'approche mécaniste fournit une compréhension détaillée des processus biologiques, tandis que l'approche statistique permet de généraliser les recommandations pour différents scénarios. L'utilisation

Conclusion Générale & Perspectives

d'une approche ontologique dans ce contexte peut faciliter la représentation et l'intégration des connaissances spécifiques sur les végétaux, les sols, les conditions climatiques, et les pratiques d'irrigation en ville. Une ontologie permet de structurer ces informations de manière sémantique, facilitant ainsi la communication entre les différents acteurs impliqués dans la gestion des espaces verts urbains.

En définitive, l'aide à la décision à l'irrigation des végétaux en ville est un domaine multidisciplinaire qui combine des modèles mécanistes et statistiques pour fournir des recommandations précises et adaptées à chaque situation. L'intégration d'une approche ontologique peut renforcer la transparence et la compréhension des processus de décision.

Perspectives

Au terme de cette étude de recherche et le domaine que nous avons investi qui ne fait encore l'objet de plusieurs études scientifique contrairement au milieu agricole et des résultats obtenus, les perspectives de ces travaux sont liées d'une part aux limites auxquelles nous avons été confrontés mais aussi aux résultats très encourageants obtenus.

Cet outil d'aide à la prise de décision représente une avancée importante vers une gestion plus durable et efficace de l'irrigation des végétaux en ville, contribuant ainsi à la préservation de nos espaces verts urbains et à la qualité de vie de nos citoyens. Il incarne la fusion réussie entre la science et la pratique pour relever les défis environnementaux de nos jours. Il est important de noter que la construction de l'outil n'a pas abouti dans le cadre de cette thèse.

La prochaine préoccupation du projet dans le court terme est de déployer l'outil dans les systèmes d'informations. Ses limites, notamment en ce qui concerne la prise en compte de certains facteurs pratiques et réglementaires propres à chaque contexte urbain. Ces défis complexes ne peuvent pas toujours être modélisés de manière exhaustive.

La construction de l'ontologie sera poursuivie en prenant en compte plusieurs sources de connaissances en l'occurrence des enquêtes détaillées auprès des acteurs de la ville comme les gestionnaires, les experts qui travaillent sur la question de l'irrigation en ville et consulter aussi d'autres sources comme des articles des magazines spécialisant sur l'irrigation en ville et les articles des professionnels comme UneP.

Pour l'avenir, l'outil intégrera des données de contraintes opérationnelles en temps réel, en affinant les modèles et en explorant des méthodes d'apprentissage automatique pour une prise

Conclusion Générale & Perspectives

de décision encore plus précise, les réseaux de neurones pourront être utilisées dans ce contexte. De plus, la collaboration avec les parties prenantes, y compris les gestionnaires de végétaux en ville est importante pour adapter cet outil aux besoins spécifiques des espaces verts.

Annexes

Cette thèse a été financée dans le cadre du dispositif de la convention industrielle de formation par la recherche (Cifre) par l'ANRT en collaboration avec l'entreprise Urbasense et les laboratoires Ummisco de l'IRD et Botanique de l'IFAN (Dakar). C'est un dispositif créé en 1981 et qui subventionne toute entreprise de droit français qui embauche un doctorant pour le placer au cœur d'une collaboration de recherche avec un laboratoire public.

Urbasense

L'entreprise Urbasense a été créée en avril 2015 avec pour objectif d'aider les professionnels de la nature en ville à faire face à la demande et à l'exigence croissante d'une part, et à la baisse drastique des moyens pour gérer les espaces de nature en ville d'autre part.

Les principaux clients et utilisateurs sont : les collectivités gestionnaires, la filière du paysage, les maîtres d'œuvre, les aménageurs (SEM, EPA) et promoteurs immobiliers.

URBASENSE se positionne comme le leader français des services aux collectivités pour la gestion écologique à moindre coût des infrastructures paysagères (espaces verts, parcs et jardins...) grâce à des technologies innovantes, avec deux principales propositions de valeur :

- Maitriser la qualité des plantations sur les opérations d'urbanisme et pour la gestion du patrimoine arboré.
- Rationaliser la programmation des arrosages automatiques pour réduire la consommation en eau au strict nécessaire.

L'eau est un vecteur de coûts considérables : l'eau elle-même, mais surtout la main d'œuvre déployée pour l'arrosage (souvent manuelle) des végétaux : arbres, jardinières de fleurissement. D'un point de vue agronomique, la maîtrise de la ressource « eau » représente un gisement d'économies indispensable.

Urbasense utilisent des outils d'aide à la décision avancés pour fournir des informations précises sur l'état des arbres et de la végétation en ville pour accompagner ses clients à prendre des décisions éclairées concernant la gestion et l'entretien des espaces verts urbains mais aussi pour une utilisation efficiente des ressources.

À ce jour le capital social est détenu par les deux co-fondateurs Thomas Bur et Michaël Fayaud. Ainsi, ce projet est en parfaite adéquation avec l'entreprise urbasense qui travaille depuis 2015 sur le monitoring des végétaux urbains.

Ummisco-IRD

L'unité mixte internationale (UMI 209) UMMISCO (“Unité Mixte Internationale de Modélisation Mathématique et Informatiques des Systèmes Complexes”), actuellement dirigée par Jean-Daniel ZUCKER, est une UMR internationale, sous les tutelles françaises de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) et de Sorbonne Université, qui a pour thématique la modélisation mathématique et informatique des systèmes complexes. À l'IRD, cette unité dépend du département Société et Mondialisation (SOC) et de Sorbonne Université. UMMISCO a aussi comme tutelles des universités du Sud : l'université Cadi Ayyad (UCA) à Marrakech (Maroc), l'université Cheikh Anta Diop (UCAD) à Dakar (Sénégal), l'université Gaston Berger (UGB) à Saint-Louis (Sénégal), l'université de Yaoundé I (Cameroun) et l'Université des Sciences et Technologie de Hanoi (USTH) au Vietnam. L'UMI UMMISCO a été créée le 1er janvier 2009, puis renouvelée une première fois au 1er Janvier 2014 et une seconde fois en 2018. Lors du dernier renouvellement, l'Aide à la décision a été identifiée comme un thème majeur pour les années à venir. Nul doute que cette thèse apportera des résultats intéressants pour l'unité. Son dispositif Cifre formera un cadre idéal pour mener à bien de telles recherches.

Laboratoire Botanique-IFAN

Le laboratoire de Botanique, actuellement dirigé par Mathieu GUEYE, a été créé en 1941 avec pour principal objectif la constitution d'une banque des espèces végétales de l'Afrique Occidentale lors de l'occupation française. Son Herbier représentatif de l'Afrique continentale et insulaire est une collection à la fois ancienne et contemporaine avec près de 60 000 spécimens répartis dans 353 Familles et 8 726 espèces. L'ethnobotanique, la systématique taxonomie botanique, flore et végétation constituent les principales activités de recherche.

Expérimentations et les travaux lors de la thèse

Lors de cette thèse, nous avons mené plusieurs expériences sur le terrain en déployant des capteurs tensiométriques sur différentes strates végétales. Nous avons aussi participé aux différents projets de recherches et d'expérimentations tels que le dispositif X sonde, le projet Garibaldi, Artisan, Grenoble Alexpo, Cooltrees.

Dispositif Expérimental X Sondes sur les jeunes arbres

Le présent document présente un protocole de suivi des arbres par la tensiométrie qui s'est déjà montré très intéressante dans le suivi des jeunes arbres urbains. Elle permet de déterminer et de suivre l'activité racinaire de l'arbre dans sa motte et dans son environnement de plantation. Plusieurs sondes seront installées au pied de l'arbre pour suivre l'activité et le développement racinaire vis-à-vis de la consommation d'eau.

Ainsi la question pertinente consisterait à savoir combien de sondes et sur quel emplacement peut-on adopter pour suivre un jeune arbre dans sa motte et son environnement de plantation pour favoriser la reprise et le développement racinaire sans conduire à une consommation d'eau qui pourrait s'avérer problématique dans ce contexte actuel ?

1 Protocole expérimental

1.1 Matériel végétal

Contrairement à la production agricole où la diversité végétale dans un champ est quasiment inexistante, les espaces verts particulièrement les arbres sont souvent constitués de plusieurs types d'espèces au sein même d'un site.

Il est important de considérer dans cette étude plusieurs types d'essences pour prendre en compte la diversité végétale. Dans le cadre de nos précédentes études sur la dynamique racinaire des arbres urbains, nous avons déterminé qu'il existe une variabilité importante sur l'activité et le développement racinaire des arbres urbains. Compte tenu de cette étude, nous avons choisi 4 genres très utilisés dans les projets d'aménagement des espaces verts pour mener notre expérimentation. Il s'agit de quercus, platane, Pinus, Prunus.

1.2 Caractéristiques des arbres et du pied de l'arbre

Force	“Sujet moyen”
Substrat	Pleine terre
Présence vivace	Non

1.3 Sites expérimentaux

Les sites sont choisis en fonction du type de climat de la région. Nous avons choisi pour le moment 3 sites en France : Nord (Ile de France), Sud méditerranéen (Aix en province), Sud-est (Lyon).

2.3 Emplacement des sondes

Pour un sujet, 27 sondes seront déployées au pied de l'arbre selon l'emplacement suivant :

- 3 sondes dans la motte, 2 de 25cm et 1 de 75cm
- 24 sondes (12 de 25cm et 12 de 75cm) réparties entre les quatre côtés de la bordure de la motte comme suit dans chaque côté :
 - 20cm du bord de la motte, deux sondes de 25cm et 75cm
 - 40cm du bord de la motte, deux sondes de 25cm et 75cm
 - 80cm du bord de la motte, deux sondes de 25cm et 75cm



Figure Annexe 1 : Installation du dispositif des 27 sondes au pied des arbres nouvellement transplantés au chatou en Ile de France (A - Essence : Prunus, dispositif installé le 22/01/2021 ; B – Essence : Quercus, dispositif installé le 22/01/2021 ; C – Essence : Pinus, dispositif installé le 26/03/2021)

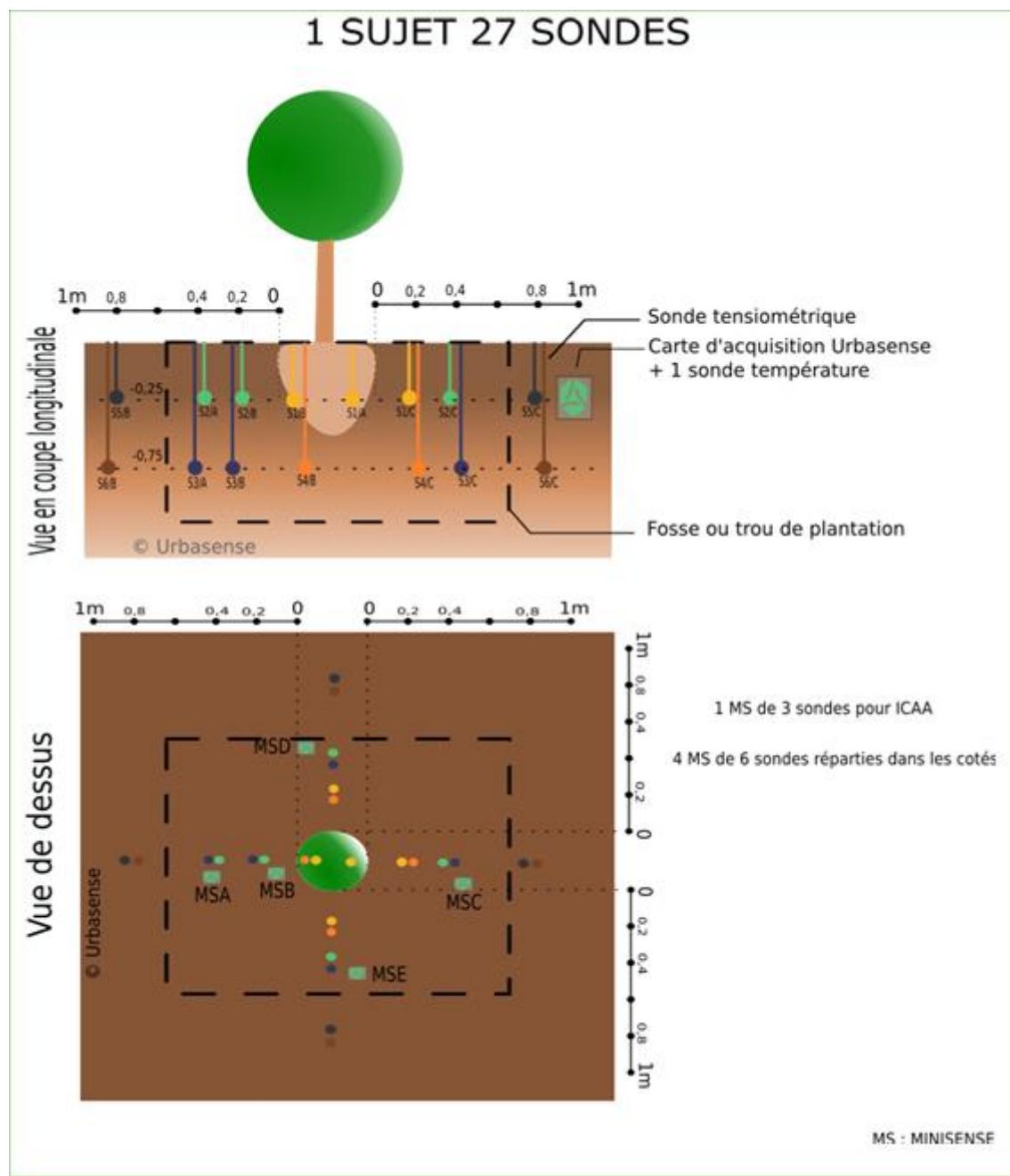


Figure Annexe 2 : Schéma d'emplacement des 27 sondes au pied de l'arbre

Projet Garibaldi : Expérimentation sur le pouvoir rafraîchissant de la végétation :
Requalification de la rue Garibaldi à Lyon

Dans le cadre de son plan climat, la Métropole de Lyon expérimente et développe des solutions pour atténuer les effets du réchauffement et lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain grâce au végétal.

Le réaménagement de la rue Garibaldi vise à progressivement transformer une importante artère urbaine en un corridor naturel bordé d'une voirie apaisée. L'objectif ultime est de créer

une promenade paysagère ombragée au cœur de la ville, s'étendant sur plus de 3 km, reliant le Parc de la Tête d'Or au nouveau Parc Blandan. Ce projet expérimente l'utilisation d'une méthode innovante d'irrigation pour encourager l'évapotranspiration des arbres.

Les principaux objectifs de cette initiative sont les suivants :

1. Développer une forme de "climatisation naturelle" de l'espace urbain grâce à la végétation, en favorisant l'évapotranspiration des arbres et l'évaporation par le sol, particulièrement pendant les périodes de canicules.
2. Évaluer l'impact de l'apport d'eau supplémentaire aux arbres sur les températures environnantes.
3. Maintenir en bonne santé la végétation existante tout en exploitant les réserves d'eau de pluie disponibles.

Après la mise en place des palettes végétales tout au long de la rue et le bassin pour récupérer les eaux de pluies, des capteurs sont installés pour :

- Suivre le niveau d'eau dans le bassin de stockage des eaux pluviales servant pour l'irrigation ;
- Surveiller la disponibilité en eau pour les racines par tensiométrie ;
- Évaluer la transpiration des arbres par des variations micrométriques ;
- Évaluer l'atténuation thermique par des mesures continues de température dans le sol, dans l'arbre et dans la rue non végétalisée.

La sélection des plantes et la préparation du sol ont été planifiées de manière à garantir que la végétation puisse se développer de manière autonome une fois la phase initiale d'installation achevée. L'irrigation est uniquement fournie lors des périodes de canicules, dans le but d'évaluer les avantages en termes de rafraîchissement pouvant être obtenus.

La question scientifique qui a été posée est : Peut-on augmenter l'efficacité rafraîchissante du végétal, en particulier des arbres, pendant les vagues de chaleur, en procédant à des irrigations ponctuelles et massives des plantes afin de relancer ou d'augmenter leur évapotranspiration ?



Figure Annexe 3 : Schéma du dispositif expérimental sur la rue Garibaldi, WL : réserve d'eau, SH : sondes tensiométriques, MD : capteurs dendrométriques, FT : mini station météo

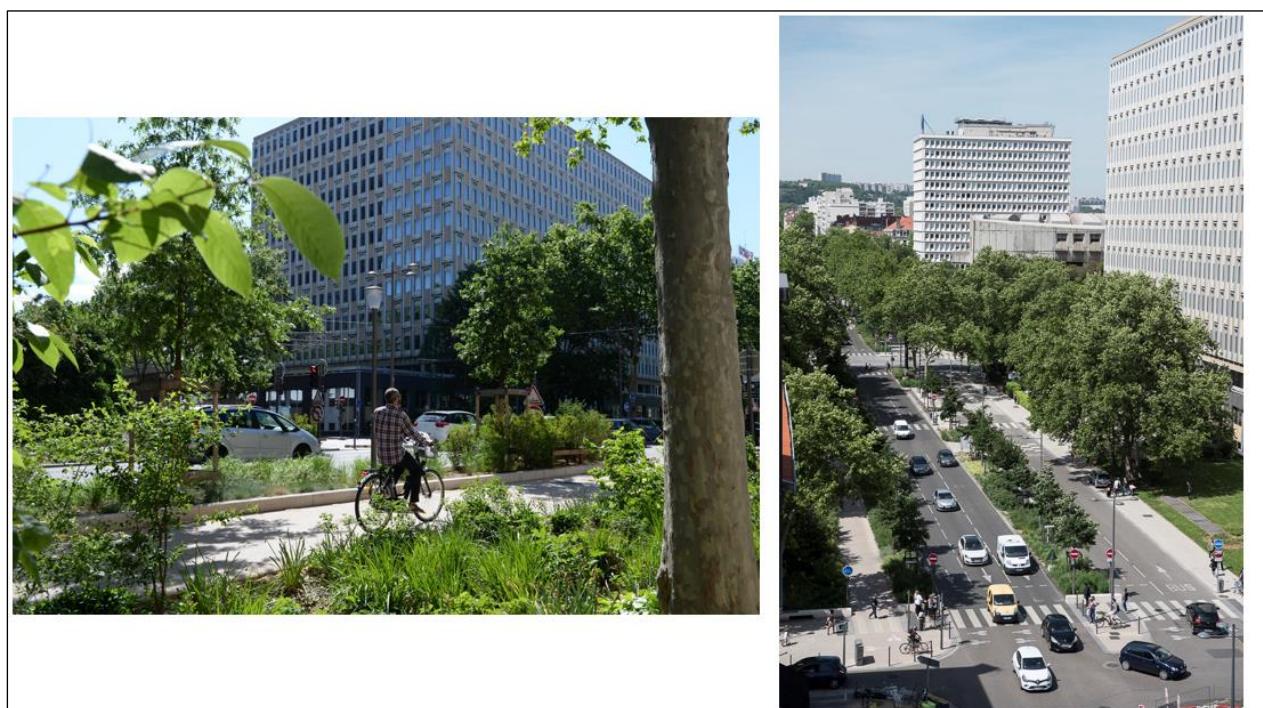


Figure Annexe 4 : Vue de la rue Garibaldi (source : métropole Lyon)

Dans le cadre de cette thèse nous avons participé au développement de l'outil de prise de décision de l'arrosage. Les données du sol, de la variation dendrométrique, les données météo du site et les données de la disponibilité de l'eau dans le bassin sont utilisées dans l'outil pour déclencher l'arrosage lors des périodes canicules. Nous avons participé aussi à la réalisation du

rapport complet de l'expérimentation publié à l'issue de la campagne de mesures et d'évaluation menée à chaque année de suivi, afin de faire connaitre au plus grand nombre cette expérimentation et les perspectives de rafraîchissement urbain par le végétal.

Projet Grenoble : Jardin bioclimatique

Dans le cadre de cette thèse, nous avons participé à la réalisation de l'expérimentation de la mesure de la température ressentie sur le pavé du Alexpo à Grenoble. Le flyer suivant explique le projet et les résultats obtenus lors de l'expérimentation.

GRENOBLE ALPEXPO JARDIN BIOCLIMATIQUE



VÉGÉTALISER LA VILLE POUR LA RAFRAICHER

Grenoble Alpes Métropole, avec le plan Grand Alpes, transforme son territoire pour l'adapter au changement climatique. Des dispositifs d'atténuation des températures extrêmes sont déployés pour mieux résister aux canicules et imiter les effets d'ilots de chaleur urbains (ICU). Le jardin bioclimatique du parvis d'Alpes Congrès est une expérimentation de végétalisation réversible, pour évaluer les effets de ces dispositifs sur la température ressentie.

ILOT VÉGÉTAL



6 îlots composés de 131 jeunes arbres en conteneurs et une prairie ont été installés sur le parvis. En évaporant l'eau, le végétal rafraîchit ses feuilles et l'air qui l'entoure. Il améliore ainsi le ressenti de la place.

Le vélum est une grande voile suspendue servant à protéger le lieu du soleil. Cette invention romaine offre une ombre confortable, tout en permettant la circulation de l'air. L'installation est légère et réversible.



VELUM

MICRO-CAPTEURS



Cette station météo améliorée mesure la température ressentie: elle intègre notamment la vitesse du vent et la température radiante.



Des capteurs sont placés dans le sol pour déterminer le besoin en eau et l'activité des racines des végétaux. L'arrosage est ainsi optimisé.



GRENOBLE ALPES MÉTROPOLE



Urbasense®

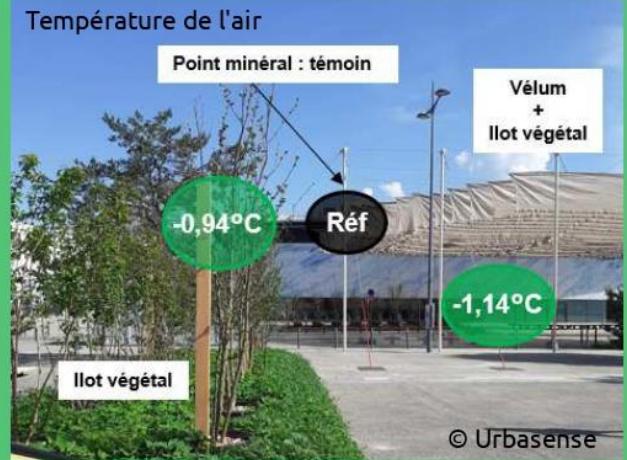
S M L

Peaks



AU PIC DE LA CANICULE : L'EFFET DU VÉGÉTAL

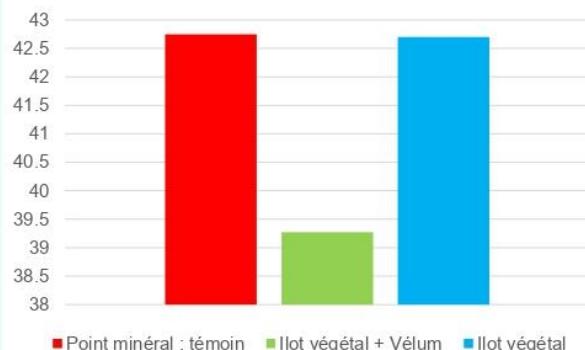
Tous les espaces végétalisés et/ou ombragés, offrent un gain de Température de l'air pendant les périodes de canicule du mois de juillet 2022 comparés aux espaces minéralisés (point minéral témoin), de 0,94°C pour les espaces végétalisés par des îlots végétaux seules, jusqu'à 1,14°C pour les espaces végétalisés et ombragés (îlot végétal + vélum). Les espaces végétalisés participent donc au rafraîchissement du parvis.



TEMPÉRATURE RADIANTE : L'EFFET DE L'OMBRE

En revanche, l'ombrage du vélum est plus efficace pour la diminution de la chaleur échangée par rayonnement solaire. Les espaces végétalisés diminuent la chaleur de rayonnement solaire de 0,05°C de température radiante par rapport aux espaces minéralisés et jusqu'à 3,48°C pour les espaces végétalisés et ombragés (îlot végétal + vélum).

T° Radiante les après midi de la période de canicule de juillet 2022



-36

INDICE DE CONFORT THERMIQUE AU PLUS PRÈS DU RESENTI

C'est le nombre de jours de stress thermique très élevé (> 38° ressentis) que les espaces végétalisés et ombragés par le vélum ont permis d'éviter par rapport au point de référence minéralisé. Les résultats ont mis en évidence l'effet significatif du vélum sur la température ressentie, très efficace pour réduire le stress thermique. Les îlots végétaux seuls ont un effet d'atténuation thermique moins significatif car leurs houppier ne sont pas encore assez développés pour fournir suffisamment d'ombre. En attendant qu'ils poussent, un ombrage supplémentaire est un très bon complément pour rafraîchir la place.

LIMITES ET PERSPECTIVES

L'étude devrait être prolongée en 2023, le développement des îlots de végétaux permettra de fournir plus d'ombre pour impacter très positivement la température ressentie. Cela pourrait permettre de produire plus de fraîcheur dans le site.



- Réversibilité, rapidité de l'installation
- Éfficacité et frugalité des solutions
- Coût modéré
- Adaptation des végétaux aux conditions locales pour replantation ultérieure



- Besoin d'arrosage en été
- Attendre la pousse pour avoir davantage d'ombre

Références bibliographiques

- Abbasi, N., Nouri, H., Didan, K., Barreto-Muñoz, A., Chavoshi Borujeni, S., Salemi, H., Opp, C., Siebert, S., & Nagler, P. (2021). Estimating actual evapotranspiration over croplands using vegetation index methods and dynamic harvested area. *Remote Sensing*, 13(24), 5167.
- Abdullah, N. H. H., Kuan, N. W., Ibrahim, A., Ismail, B. N., Majid, M. R. A., Ramli, R., & Mansor, N. S. (2018). Determination of soil water content using time domain reflectometer (TDR) for clayey soil. *AIP Conference Proceedings*, 2020(1).
- Abrisqueta J.M., O. Mounzer, S. Álvarez, W. Conejero, Y. García-Orellana, Tapia, L. M., Vera, J., Abrisqueta, I., & Ruiz-Sánchez, M. C. (2008). Root dynamics of peach trees submitted to partial rootzone drying and continuous deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, vol.95(n.8), p.959-967. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.03.003>
- Adla, S., Rai, N. K., Karumanchi, S. H., Tripathi, S., Disse, M., & Pande, S. (2020). Laboratory Calibration and Performance Evaluation of Low-Cost Capacitive and Very Low-Cost Resistive Soil Moisture Sensors. *Sensors*, 20(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/s20020363>
- Agence France Presse. (2022, juillet 5). Italy declares state of emergency in drought-hit northern regions. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2022/jul/05/italy-declares-state-emergency-drought-hit-northern-regions>
- Ahmali, A., Mandi, L., Loutfi, K., El Ghadraoui, A., El Mansour, T. E., El Kerroumi, A., Hejjaj, A., Del Bubba, M., & Ouazzani, N. (2020). Agro-physiological responses of Koroneiki olive trees (*Olea europaea* L.) irrigated by crude and treated mixture of olive mill and urban wastewaters. *Scientia Horticulturae*, 263, 109101. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109101>
- Ai, H., & Zhou, Z. (2023). Green growth : The impact of urban forest construction on economic growth in China. *Economic Modelling*, 125, 106366. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2023.106366>
- Aksoy, A., Ozturk, N., & Sucky, E. (2012). A decision support system for demand forecasting in the clothing industry. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 24(4), 221-236.
- Allen, R. G., Dukes, M. D., Snyder, R. L., Kjelgren, R., & Kilic, A. (2020). A review of landscape water requirements using a multicomponent landscape coefficient. *Transactions of the ASABE*, 63(6), 2039-2058.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Howell, T. A., & Jensen, M. E. (2011). Evapotranspiration information reporting : I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98(6), 899-920. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), D05109.
- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 380-394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Alvarez, S., Bañón, S., & Sánchez-Blanco, M. J. (2013). Regulated deficit irrigation in different phenological stages of potted geranium plants : Water consumption, water relations and

Références bibliographiques

- ornamental quality. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35(4), 1257-1267. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1165-x>
- Alvarez, S., Gómez-Bellot, M. J., Acosta-Motos, J. R., & Sánchez-Blanco, M. J. (2019). Application of deficit irrigation in Phillyrea angustifolia for landscaping purposes. *Agricultural Water Management*, 218, 193-202. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.049>
- Amarger, F., Chanet, J.-P., Haemmerlé, O., Hernandez, N., & Roussey, C. (2014). SKOS Sources Transformations for Ontology Engineering : Agronomical Taxonomy Use Case. In S. Closs, R. Studer, E. Garoufallou, & M.-A. Sicilia (Éds.), *Metadata and Semantics Research* (p. 314-328). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13674-5_29
- Anapalli, S. S., Ahuja, L. R., Gowda, P. H., Ma, L., Marek, G., Evett, S. R., & Howell, T. A. (2016). Simulation of crop evapotranspiration and crop coefficients with data in weighing lysimeters. *Agricultural Water Management*, 177, 274-283. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.009>
- Anderson, T. L., Scarborough, B., & Watson, L. R. (2013). Water Crises, Water Rights, and Water Markets**Excerpted from Tapping Water Markets, by Terry L. Anderson, Brandon Scarborough, and L. Reed Watson (2012, Routledge). In J. F. Shogren (Ed.), *Encyclopedia of Energy, Natural Resource, and Environmental Economics* (p. 248-254). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375067-9.00043-7>
- Angelakis, A. N., & Gikas, P. (2014). Water reuse : Overview of current practices and trends in the world with emphasis on EU states. *Water Utility Journal*, 8(67), e78.
- Armson, D., Stringer, P., & Ennos, A. R. (2013). The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(3), 282-286.
- Arnould, P., Le Lay, Y.-F., Dodane, C., & Mélian, I. (2011). La nature en ville : L'improbable biodiversité. *Géographie, économie, société*, 13(1), 45-68. <https://www.cairn.info/revue-geographie-economie-societe-2011-1-page-45.htm>
- Arrif, T., Blanc, N., & Clergeau, P. (2011). Trame verte urbaine, un rapport Nature – Urbain entre géographie et écologie. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.24862>
- ATGER, C., & GENOYER, P. (2017). *Sciencil : Observatoire de l'arbre urbain sur la Cité Internationale de Lyon—Synthèse thématique : Racines et partie aérienne* (p. 37) [Compte rendu d'étude]. http://arboriculture.org/pdf_uploads/genoyer/reprises-des-arbres-racines-et-tiges-compte-rendu-d-etude-atger-et-genoyer-2017.pdf
- Baker, R. E., Peña, J.-M., Jayamohan, J., & Jérusalem, A. (2018). Mechanistic models versus machine learning, a fight worth fighting for the biological community? *Biology Letters*, 14(5), 20170660. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2017.0660>
- Barbosa, A. E., Fernandes, J. N., & David, L. M. (2012). Key issues for sustainable urban stormwater management. *Water Research*, 46(20), 6787-6798. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.029>
- Barczi, J.-F., Rey, H., Griffon, S., & Jourdan, C. (2018). DigR : A generic model and its open source simulation software to mimic three-dimensional root-system architecture diversity. *Annals of Botany*, 121(5), 1089-1104. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy018>
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213, 198-212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
- Bateman, I. J., Mace, G. M., Fezzi, C., Atkinson, G., & Turner, R. K. (2014). Economic analysis for ecosystem service assessments. In *Valuing Ecosystem Services* (p. 23-77). Edward Elgar Publishing.

Références bibliographiques

- Beeson, R. C. (1994). Water Relations of Field-grown *Quercus virginiana* Mill. From Preharvest through Containerization and 1 Year into a Landscape. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 119(2), 169-174. <https://doi.org/10.21273/JASHS.119.2.169>
- Behzadian, K., & Kapelan, Z. (2015). Advantages of integrated and sustainability based assessment for metabolism based strategic planning of urban water systems. *Science of The Total Environment*, 527-528, 220-231. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.097>
- Beis, A., & Patakas, A. (2015). Differential physiological and biochemical responses to drought in grapevines subjected to partial root drying and deficit irrigation. *European Journal of Agronomy*, 62, 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.10.001>
- Ben-Gal, A., Ron, Y., Yermiyahu, U., Zipori, I., Naoum, S., & Dag, A. (2021). Evaluation of regulated deficit irrigation strategies for oil olives : A case study for two modern Israeli cultivars. *Agricultural Water Management*, 245, 106577. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106577>
- Bennie, J., Davies, T. W., Cruse, D., & Gaston, K. J. (2016). Ecological effects of artificial light at night on wild plants. *Journal of Ecology*, 104(3), 611-620.
- BENSAOUD, A., & Marié, X. (2000). Arbres d'alignement : Évaluation de l'enracinement par la méthode tensiométrique. *PHM, REVUE HORTICOLE*, N°415, 40-43.
- Berland, A. (2020). Urban tree growth models for two nearby cities show notable differences. *Urban Ecosystems*, 23(6), 1253-1261. <https://doi.org/10.1007/s11252-020-01015-0>
- Bingham, C. B., Howell, T., & Ott, T. E. (2019). Capability creation : Heuristics as microfoundations. *Strategic Entrepreneurship Journal*, 13(2), 121-153. <https://doi.org/10.1002/sej.1312>
- Bittanti, S. (2019). *Model identification and data analysis*. John Wiley & Sons.
- Bittelli, M. (2011). Measuring Soil Water Content: A Review. *HortTechnology*, 21(3), 293-300. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.21.3.293>
- Bittner, T., Donnelly, M., & Winter, S. (2005). Ontology and semantic interoperability. In *Large-scale 3D data integration* (p. 139-160). CRC Press.
- Bjorneberg, D. L., & Sojka, R. E. (2005). IRRIGATION | Methods. In D. Hillel (Éd.), *Encyclopedia of Soils in the Environment* (p. 273-280). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00276-9>
- Blatt, M. R., Jezek, M., Lew, V. L., & Hills, A. (2022). What can mechanistic models tell us about guard cells, photosynthesis, and water use efficiency? *Trends in Plant Science*, 27(2), 166-179. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.08.010>
- Boegh, E., Poulsen, R. N., Butts, M., Abrahamsen, P., Dellwik, E., Hansen, S., Hasager, C. B., Ibrom, A., Loerup, J.-K., & Pilegaard, K. (2009). Remote sensing based evapotranspiration and runoff modeling of agricultural, forest and urban flux sites in Denmark : From field to macro-scale. *Journal of Hydrology*, 377(3-4), 300-316.
- Bogena, H. R., Huisman, J. A., Oberdörster, C., & Vereecken, H. (2007). Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *Journal of Hydrology*, 344(1), 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.032>
- Bond, N. R., Burrows, R. M., Kennard, M. J., & Bunn, S. E. (2019). Chapter 6—Water Scarcity as a Driver of Multiple Stressor Effects. In S. Sabater, A. Elosegi, & R. Ludwig (Éds.), *Multiple Stressors in River Ecosystems* (p. 111-129). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811713-2.00006-6>
- Bontempi, G. (2021). *Statistical foundations of machine learning : The handbook*.
- Bossel, H. (1994). *Modeling and simulation*. AK Peters. Vieweg Verlag, Braunschweig.
- Bouazzama, B., Mailhol, J. C., Xanthoulis, D., Bouaziz, A., Ruelle, P., & Belhouchette, H. (2013). SILAGE MAIZE GROWTH SIMULATION USING PILOTE AND

Références bibliographiques

- CROPSYST MODEL : SILAGE MAIZE PRODUCTION IN THE TADLA REGION (MOROCCO). *Irrigation and Drainage*, 62(1), 84-96. <https://doi.org/10.1002/ird.1715>
- Bourgery, C., & Mailliet, L. (1993). L’arboriculture urbaine. *Collection mission du paysage*.
- Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Tsoukiàs, A., & Vincke, P. (2015). Aiding to Decide : Concepts and Issues. In R. Bisdomoff, L. C. Dias, P. Meyer, V. Mousseau, & M. Pirlot (Éds.), *Evaluation and Decision Models with Multiple Criteria : Case Studies* (p. 17-34). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46816-6_2
- Bowen, K. (2004). Sixty years of Operational Research. *European Journal of Operational Research*, 153(3), 618-623. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00267-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00267-4)
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities : A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and urban planning*, 97(3), 147-155.
- Boyjoo, Y., Pareek, V. K., & Ang, M. (2013). A review of greywater characteristics and treatment processes. *Water Science and Technology*, 67(7), 1403-1424.
- Bréda, N., Huc, R., Granier, A., & Dreyer, E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought : A review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63(6), 625-644.
- Brisson, N. (2009). *Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the Stics Crop Model*. 1-298. <https://www.torrossa.com/en/resources/an/5063316>
- Brodrribb, T., & Mencuccini, M. (2017). Xylem. In B. Thomas, B. G. Murray, & D. J. Murphy (Éds.), *Encyclopedia of Applied Plant Sciences (Second Edition)* (p. 141-148). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00074-5>
- Brown, J. F., & Pervez, M. S. (2014). Merging remote sensing data and national agricultural statistics to model change in irrigated agriculture. *Agricultural Systems*, 127, 28-40. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.01.004>
- Brzostek, E. R., Dragoni, D., Schmid, H. P., Rahman, A. F., Sims, D., Wayson, C. A., Johnson, D. J., & Phillips, R. P. (2014). Chronic water stress reduces tree growth and the carbon sink of deciduous hardwood forests. *Global change biology*, 20(8), 2531-2539.
- Buckley, R. C., & Brough, P. (2017). Economic value of parks via human mental health : An analytical framework. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5, 16.
- Cabelguenne, M. de, Jones, C. A., & Williams, J. R. (1995). Strategies for limited irrigations of maize in southwestern France—a modeling approach. *Transactions of the ASAE*, 38(2), 507-511.
- Cabrera, R. I., Wagner, K. L., & Wherley, B. (2013). An evaluation of urban landscape water use in Texas. *Texas Water Journal*, 4(2), Article 2. <https://doi.org/10.21423/twj.v4i2.6992>
- Canales-Ide, F., Zubelzu, S., & Rodríguez-Sinobas, L. (2019). Irrigation systems in smart cities coping with water scarcity : The case of Valdebebas, Madrid (Spain). *Journal of Environmental Management*, 247, 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.062>
- Car, N. J. (2018). USING decision models to enable better irrigation Decision Support Systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 152, 290-301. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.07.024>
- Caser, M., Lovisolo, C., & Scariot, V. (2017). The influence of water stress on growth, ecophysiology and ornamental quality of potted Primula vulgaris ‘Heidy’ plants. New insights to increase water use efficiency in plant production. *Plant Growth Regulation*, 83(3), 361-373. <https://doi.org/10.1007/s10725-017-0301-4>
- Chalabi, Z. S. (1998). Mathematical methods for modelling and identification of nonlinear agricultural systems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 48(1), 47-52. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(98\)00154-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(98)00154-2)

Références bibliographiques

- Chalmers, D. J., Mitchell, P. D., & Heek, L. van. (1981). Control of Peach Tree Growth and Productivity by Regulated Water Supply, Tree Density, and Summer Pruning1. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 106(3), 307-312. <https://doi.org/10.21273/JASHS.106.3.307>
- Chalmers, D. J., Mitchell, P. D., & Jerie, P. H. (1983). The physiology of growth control of peach and pear trees using reduced irrigation. *International Workshop on Controlling Vigor in Fruit Trees* 146, 143-150.
- Chapagain, D. P. (2013). Operations Research in Post Modern Era : Apple-pie with Ice-cream. *Operations Research*, 1(2). http://www.dineshchapagain.com.np/admin/files/OR%20in%20Post%20Modern%20Era_Apple%20Pie%20with%20Ice%20Cream.pdf
- Chen, J. M., & Liu, J. (2020). Evolution of evapotranspiration models using thermal and shortwave remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111594. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111594>
- Cheng, H., Yeon, C., Cho, M., & Park, C. (2023). Water requirement of Urban Green Infrastructure under climate change. *Science of The Total Environment*, 164887. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164887>
- Cheung, P. K., Livesley, S. J., & Nice, K. A. (2021). Estimating the cooling potential of irrigating green spaces in 100 global cities with arid, temperate or continental climates. *Sustainable Cities and Society*, 71, 102974. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102974>
- Chevron, B., Vervoort, R. W., Albasha, R., Dairon, R., Le Priol, C., & Mailhol, J.-C. (2016). A framework to use crop models for multi-objective constrained optimization of irrigation strategies. *Environmental Modelling & Software*, 86, 145-157. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.09.001>
- Chlingaryan, A., Sukkarieh, S., & Whelan, B. (2018). Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture : A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.012>
- Choay, F. (1965). *Urbanisme, utopies et réalités—Une anthologie*. Seuil.
- Chung, P.-W., Livesley, S. J., Rayner, J. P., & Farrell, C. (2021). Greywater irrigation can support climbing plant growth on building green façades. *Urban Forestry & Urban Greening*, 62, 127119. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127119>
- Cilliers, S., Cilliers, J., Lubbe, R., & Siebert, S. (2013). Ecosystem services of urban green spaces in African countries—Perspectives and challenges. *Urban Ecosystems*, 16(4), 681-702. <https://doi.org/10.1007/s11252-012-0254-3>
- Cirillo, C., Caputo, R., Raimondi, G., & De Pascale, S. (2013). Irrigation management of ornamental shrubs under limited water resources. *International Symposium on New Technologies for Environment Control, Energy-Saving and Crop Production in Greenhouse and Plant* 1037, 415-424.
- Cissé, D. O. (2022). *Les défis de l'urbanisation à Dakar*. Friedrich-Ebert-Stiftung.
- Clark, J. R., & Kjelgren, R. (1990). Water as a limiting factor in the development of urban trees. *Journal of arboriculture*, 16(8), 203-208.
- Cobbinah, P. B., & Darkwah, R. M. (2016). African Urbanism : The Geography of Urban Greenery. *Urban Forum*, 27(2), 149-165. <https://doi.org/10.1007/s12132-016-9274-z>
- COOLTREES. (2022). COOLTREES - Le projet ANR Cooltrees. <https://www6.inrae.fr/cooltrees/Le-projet-ANR-Cooltrees>
- Cornu, S., Keller, C., Béchet, B., Delolme, C., Schwartz, C., & Vidal-Beaudet, L. (2021). Pedological characteristics of artificialized soils : A snapshot. *Geoderma*, 401, 115321. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115321>

Références bibliographiques

- Costa, J. M., Ortúño, M. F., & Chaves, M. M. (2007). Deficit Irrigation as a Strategy to Save Water : Physiology and Potential Application to Horticulture. *Journal of Integrative Plant Biology*, 49(10), 1421-1434. <https://doi.org/10.1111/j.1672-9072.2007.00556.x>
- Costanza, R., & Daly, H. E. (1992). Natural capital and sustainable development. *Conservation biology*, 6(1), 37-46.
- Costello, L. R., Matheny, N. P., Clark, J. R., & Jones, K. S. (2000). *A Guide to Estimating Irrigation Water Needs of Landscape Plantings in California : The Landscape Coefficient Method and WUCOLS III*. University of California Cooperative Extension.
- Courbon, J. C. (1982). Processus de décision et aide à la décision. *Economies et sociétés*, 16(12).
- Craul, P. J. (1992). *Urban soil in landscape design*. John Wiley & Sons.
- Da cunha, A. (2009). *Les Cahiers du développement urbain durable*. <https://journals.openedition.org/vertigo/12670#ftn3>
- Dabach, S., Shani, U., & Lazarovitch, N. (2015). Optimal tensiometer placement for high-frequency subsurface drip irrigation management in heterogeneous soils. *Agricultural Water Management*, 152, 91-98. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.003>
- Daily, G. C. (1997). Introduction : What are ecosystem services. *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*, 1(1).
- Dalmago, G. A., Bergamaschi, H., Bergonci, J. I., Bianchi, C., Comiran, F., & Hecklere, B. M. M. (2004). Evapotranspiration in maize crops as function of soil tillage systems. *INTERNATIONAL SOIL CONSERVATION ORGANISATION CONFERENCE*, 13, 1-4.
- Davis, J. P., Eisenhardt, K. M., & Bingham, C. B. (2009). Optimal Structure, Market Dynamism, and the Strategy of Simple Rules. *Administrative Science Quarterly*, 54(3), 413-452. <https://doi.org/10.2189/asqu.2009.54.3.413>
- De Groot, R. S., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L., & Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological complexity*, 7(3), 260-272.
- De Smedt, J., Yeshchenko, A., Polyvyanyy, A., De Weerdt, J., & Mendling, J. (2023). Process model forecasting and change exploration using time series analysis of event sequence data. *Data & Knowledge Engineering*, 145, 102145. <https://doi.org/10.1016/j.datak.2023.102145>
- Debaeke, P., & Aboudrare, A. (2004). Adaptation of crop management to water-limited environments. *European Journal of Agronomy*, 21(4), 433-446. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.07.006>
- de Coninck, H., Revi, A., Babiker, M., Bertoldi, P., Buckeridge, M., Cartwright, A., Dong, W., Ford, J., Fuss, S., Hourcade, J.-C., Ley, D., Mechler, R., Newman, P., Revokatova, A., Schultz, S., Steg, L., Sugiyama, T., Araos, M., Bakker, S., ... Wollenberg, L. (2018). Chapter 4 : Strengthening and implementing the global response. In *Global Warming of 1.5 °C an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/sr15/>
- Delay, E., Ka, A., Niang, K., Touré, I., & Goffner, D. (2022). Coming back to a Commons approach to construct the Great Green Wall in Senegal. *Land Use Policy*, 115, 106000. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106000>
- de Lima, R. S. N., de Assis Figueiredo, F. A. M. M., Martins, A. O., de Deus, B. C. da S., Ferraz, T. M., Gomes, M. de M. de A., de Sousa, E. F., Glenn, D. M., & Campostrini, E. (2015). Partial rootzone drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) effects on stomatal conductance, growth, photosynthetic capacity, and water-use efficiency of

Références bibliographiques

- papaya. *Scientia Horticulturae*, 183, 13-22.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.005>
- Denys, S. (2002). Modèles de transfert sol-plante des polluants organiques. *INERIS: Institut National de l'Environnement Industriel des Risques*, 1, 43.
- de Vilmorin, C. (1976). *Politique d'espaces verts (La)—Thèse soutenue sous le nom de Catherine Lesguillons le 10 mars 1976 [CENTRE DE RECHERCHE ET D'URBANISME]*. PARIS]. <https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/87607/politique-d-espaces-verts-la-these-soutenue-sous-le-nom-de-catherine-lesguillons-le-10-mars-1976>
- Devitt, D. A., Carstensen, K., & Morris, R. L. (2008). Residential water savings associated with satellite-based ET irrigation controllers. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(1), 74-82.
- Devlin, B., & Magill, G. (2006). The process of ethical decision making. *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, 20(4), 493-506.
<https://doi.org/10.1016/j.bpa.2006.09.001>
- Dia, A., & Duponnois, R. (2012). *Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte : Concepts et mise en œuvre*. IRD Editions.
- Dieng-Kuntz, R., Minier, D., Růžička, M., Corby, F., Corby, O., & Alamarguy, L. (2006). Building and using a medical ontology for knowledge management and cooperative work in a health care network. *Computers in Biology and Medicine*, 36(7), 871-892.
<https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2005.04.015>
- Ding, W., Zhao, Y., Xin, W., He, W., & Xu, L. (2021). Parameter extraction method of virtual plant growth model based on Improved Particle Swarm Optimization. *Computers and Electronics in Agriculture*, 191, 106470.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106470>
- Doll, C., Polyakov, M., Pannell, D. J., & Burton, M. P. (2022). Rethinking urban park irrigation under climate change. *Journal of Environmental Management*, 314, 115012.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115012>
- Dostálek, J., Weber, M., & Frantík, T. (2014). Establishing windbreaks : How rapidly do the smaller tree transplants reach the height of the larger ones? *Journal of Forest Science*, 60(No. 1), 12-17. <https://doi.org/10.17221/53/2013-JFS>
- Drénou, C., Bonneau, M., Charnet, F., Cruziat, P., Frochot, H., Garbaye, J., Girard, S., Larrieu, L., Lévy, G., Marçais, B., Moore, W., & Rossignol, J.-P. (2006). *Les Racines : Face cachée des arbres*. Institut pour le Développement Forestier.
- Drew-Smythe, J. J., Davila, Y. C., McLean, C. M., Hingee, M. C., Murray, M. L., Webb, J. K., Krix, D. W., & Murray, B. R. (2023). Community perceptions of ecosystem services and disservices linked to urban tree plantings. *Urban Forestry & Urban Greening*, 82, 127870. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127870>
- Drisya, J., D, S. K., & Roshni, T. (2018). Chapter 27—Spatiotemporal Variability of Soil Moisture and Drought Estimation Using a Distributed Hydrological Model. In P. Samui, D. Kim, & C. Ghosh (Éds.), *Integrating Disaster Science and Management* (p. 451-460). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812056-9.00027-0>
- Du, H., Wei, L., Dimitrova, V., Magee, D., Clarke, B., Collins, R., Entwistle, D., Eskandari Torbaghan, M., Curioni, G., Stirling, R., Reeves, H., & Cohn, A. G. (2023). City infrastructure ontologies. *Computers, Environment and Urban Systems*, 104, 101991.
<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2023.101991>
- Dubois, A., Teytaud, F., & Verel, S. (2021). Short term soil moisture forecasts for potato crop farming : A machine learning approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 180, 105902. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105902>

Références bibliographiques

- Ducheyne, S., Schadeck, N., Vanongeval, L., Vandendriessche, H., & Feyen, J. (2001). Assessment of the parameters of a mechanistic soil–crop–nitrogen simulation model using historic data of experimental field sites in Belgium. *Agricultural Water Management*, 51(1), 53-78. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00140-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00140-2)
- Dupont, S. (2001). *Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine : Réalisation du modèle de sols urbains pour SUBMESO*. Université de Nantes.
- Dupuy, L., Gregory, P. J., & Bengough, A. G. (2010). Root growth models : Towards a new generation of continuous approaches. *Journal of Experimental Botany*, 61(8), 2131-2143. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp389>
- Dupuy, L., Vignes, M., Mckenzie, B. M., & White, P. J. (2010). The dynamics of root meristem distribution in the soil. *Plant, Cell & Environment*, 33(3), 358-369. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02081.x>
- Duris, P. (2007). Nature et art au XVIIIe siècle. À propos de la Théorie des jardins (1776) de Jean-Marie Morel. *Bulletin d'histoire et d'épistémologie des sciences de la vie*, Volume 14(1), 7-23. <https://doi.org/10.3917/bhesv.141.0007>
- Eicker, U. (Éd.). (2019). 3 - Building energy demand modeling : From individual buildings to urban scale. In *Urban Energy Systems for Low-Carbon Cities* (p. 79-136). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811553-4.00003-2>
- Endy, D., & Brent, R. (2001). Modelling cellular behaviour. *Nature*, 409(6818), Article 6818. <https://doi.org/10.1038/35053181>
- Escobedo, F. J., Giannico, V., Jim, C. Y., Sanesi, G., & Laforteza, R. (2019). Urban forests, ecosystem services, green infrastructure and nature-based solutions : Nexus or evolving metaphors? *Urban Forestry & Urban Greening*, 37, 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.02.011>
- Escobedo, F. J., Kroeger, T., & Wagner, J. E. (2011). Urban forests and pollution mitigation : Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, 159(8-9), 2078-2087. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.010>
- Esperon-Rodriguez, M., Power, S. A., Tjoelker, M. G., & Rymer, P. D. (2022). Future climate risk and urban tree inventories in Australian cities : Pitfalls, possibilities and practical considerations. *Urban Forestry & Urban Greening*, 78, 127769. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127769>
- Esperon-Rodriguez, M., Quintans, D., & Rymer, P. D. (2023). Urban tree inventories as a tool to assess tree growth and failure : The case for Australian cities. *Landscape and Urban Planning*, 233, 104705. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104705>
- FAO. (2020). *Water Scarcity – One of the greatest challenges of our time*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/zhc/detail-events/en/c/880881/>
- FAO. (2022). *AGROVOC: AGROVOC Multilingual Thesaurus*. <https://agrovoc.fao.org/browse/agrovoc/en/>
- FAO, F. (2018). Food and agriculture organization of the United Nations. *Rome, URL: http://faostat.fao.org*.
- Fascicule n°35 du CCTG - Les entreprises du paysage, (2021). <https://www.lesentreprisesdupaysage.fr/fascicule-35/>
- Feldhake, C. M., Danielson, R. E., & Butler, J. D. (1984). Turfgrass Evapotranspiration. 11. Responses to Deficit Irrigation1. *Agronomy Journal*, 76(1), 85-89. <https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600010022x>
- Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147-159. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>
- Ffrench-Constant, R. H., Somers-Yeates, R., Bennie, J., Economou, T., Hodgson, D., Spalding, A., & McGregor, P. K. (2016). Light pollution is associated with earlier tree budburst

Références bibliographiques

- across the United Kingdom. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1833), 20160813.
- Fister, K. R. (2004). Mathematical Models in Biology. *Bulletin of Mathematical Biology*, 66(6), 1933-1934. <https://doi.org/10.1016/j.bulm.2004.07.002>
- Fityus, S., Wells, T., & Huang, W. (2011). Water content measurement in expansive soils using the neutron probe. *Geotechnical Testing Journal*, 34(3), 255-264.
- Fitzpatrick, M. J., Mathewson, P. D., & Porter, W. P. (2019). Chapter 12—Ecological Energetics of Whooping Cranes in the Eastern Migratory Population. In P. J. Nyhus, J. B. French, S. J. Converse, J. E. Austin, & J. h. Delap (Éds.), *Whooping Cranes : Biology and Conservation* (p. 239-265). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803555-9.00012-8>
- Flenga, M. G., & Favata, M. J. (2023). A risk-targeted decision model for the verification of the seismic performance of RC structures against structural pounding. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 175, 108229. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108229>
- Franklin, J. F., Shugart, H. H., & Harmon, M. E. (1987). Tree death as an ecological process. *BioScience*, 37(8), 550-556.
- Gao, H., Zhangzhong, L., Zheng, W., & Chen, G. (2023). How can agricultural water production be promoted ? a review on machine learning for irrigation. *Journal of Cleaner Production*, 414, 137687. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137687>
- García-Pardo, K. A., Moreno-Rangel, D., Domínguez-Amarillo, S., & García-Chávez, J. R. (2022). Remote sensing for the assessment of ecosystem services provided by urban vegetation : A review of the methods applied. *Urban Forestry & Urban Greening*, 74, 127636. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127636>
- Gérardin, H., Dos Santos, S., & Gastineau, B. (2016). Présentation. Des Objectifs du Millénaire pour le développement (OMD) aux Objectifs de développement durable (ODD) : La problématique des indicateurs. *Mondes en développement*, 174(2), 7-14. <https://doi.org/10.3917/med.174.0007>
- Gérazine, A., Nguyen, T.-L., Carbonnel, F., Guerdoux-Ninot, E., & Ninot, G. (2018). Ontologie des interventions non médicamenteuses. *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique*, 66, S42. <https://doi.org/10.1016/j.respe.2018.01.093>
- Ghavami, S. M., Taleai, M., & Arentze, T. (2022). An intelligent web-based spatial group decision support system to investigate the role of the opponents' modeling in urban land use planning. *Land Use Policy*, 120, 106256. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106256>
- Gillner, S., Vogt, J., Tharang, A., Dettmann, S., & Roloff, A. (2015). Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites. *Landscape and Urban Planning*, 143, 33-42. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.06.005>
- Gilman, E. F., Miesbauer, J., Harchick, C., & Beeson, R. C. (2013). Impact of tree size and container volume at planting, mulch, and irrigation on Acer rubrum L. growth and anchorage. *Arboriculture & Urban Forestry*, 39(4), 173-181.
- Gimpel, H., Graf-Drasch, V., Hawlitschek, F., & Neumeier, K. (2021). Designing smart and sustainable irrigation : A case study. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128048. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128048>
- Gobat, J.-M., Aragno, M., & Matthey, W. (2010). *Le sol vivant : Bases de pédologie, biologie des sols*. PPUR Presses polytechniques.
- Gornott, C., & Wechsung, F. (2016). Statistical regression models for assessing climate impacts on crop yields : A validation study for winter wheat and silage maize in Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 217, 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.10.005>

Références bibliographiques

- Gourrierec, S. L. (2012). *L'arbre en ville : Le paysagiste concepteur face aux contraintes du projet urbain* [Mémoire de Fin d'Etudes]. Agrocampus Ouest.
- Granier, A., Reichstein, M., Bréda, N., Janssens, I. A., Falge, E., Ciais, P., Grünwald, T., Aubinet, M., Berbigier, P., & Bernhofer, C. (2007). Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year : 2003. *Agricultural and forest meteorology*, 143(1-2), 123-145.
- Grossnickle, S. C. (2005). Importance of root growth in overcoming planting stress. *New Forests*, 30(2), 273-294. <https://doi.org/10.1007/s11056-004-8303-2>
- Guntur, J., Srinivasulu Raju, S., Jayadeepthi, K., & Sravani, C. (2022). An automatic irrigation system using IOT devices. *Materials Today: Proceedings*, 68, 2233-2238. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.438>
- Guo, J.-Y., Shi, B., Sun, M.-Y., Cheng, W., Zhang, C.-C., Wei, G.-Q., & Wang, X. (2022). Application of PI-FBG sensor for humidity measurement in unsaturated soils. *Measurement*, 188, 110415. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110415>
- Guo, L., Cao, H., Helgason, W. D., Yang, H., Wu, X., & Li, H. (2022). Effect of drip-line layout and irrigation amount on yield, irrigation water use efficiency, and quality of short-season tomato in Northwest China. *Agricultural Water Management*, 270, 107731. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107731>
- Guo, S.-H., Yang, B.-H., Wang, X.-W., Li, J.-N., Li, S., Yang, X., Ren, R.-H., Fang, Y.-L., Xu, T.-F., Zhang, Z.-W., & Meng, J.-F. (2021). ABA signaling plays a key role in regulated deficit irrigation-driven anthocyanins accumulation in 'Cabernet Sauvignon' grape berries. *Environmental and Experimental Botany*, 181, 104290. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104290>
- Haddon, A., Kechichian, L., Harmand, J., Dejean, C., & Ait-Mouheb, N. (2023). Linking soil moisture sensors and crop models for irrigation management. *Ecological Modelling*, 484, 110470. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110470>
- Hale, J. D., Pugh, T. A., Sadler, J. P., Boyko, C. T., Brown, J., Caputo, S., Caserio, M., Coles, R., Farmani, R., & Hales, C. (2015). Delivering a multi-functional and resilient urban forest. *Sustainability*, 7(4), 4600-4624.
- Hamze, M., Cheviron, B., Baghdadi, N., Lo, M., Courault, D., & Zribi, M. (2023). Detection of irrigation dates and amounts on maize plots from the integration of Sentinel-2 derived Leaf Area Index values in the Optirrig crop model. *Agricultural Water Management*, 283, 108315. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108315>
- Harris, J. R., Day, S. D., & Kane, B. (2008). Nitrogen fertilization during planting and establishment of the urban forest : A collection of five studies. *Urban Forestry & Urban Greening*, 7(3), 195-206. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2008.03.001>
- Hartin, J. S., Fujino, D. W., Oki, L. R., Reid, S. K., Ingels, C. A., & Haver, D. (2018). Water Requirements of Landscape Plants Studies Conducted by the University of California Researchers. *HortTechnology*, 28(4), 422-426. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04037-18>
- Hedley, C. B., Knox, J. W., Raine, S. R., & Smith, R. (2014). Water : Advanced Irrigation Technologies. In N. K. Van Alfen (Ed.), *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems* (p. 378-406). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00087-5>
- Hilbert, D. R., Roman, L. A., Koeser, A. K., Vogt, J., & van Doorn, N. S. (2019). Urban tree mortality : A literature review. *Arboriculture & Urban Forestry*, 45(5).
- Himanshu, S. K., Ale, S., Bordovsky, J., & Darapuneni, M. (2019). Evaluation of crop-growth-stage-based deficit irrigation strategies for cotton production in the Southern High Plains. *Agricultural Water Management*, 225, 105782. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105782>

Références bibliographiques

- Hitzler, P. (2021). A review of the semantic web field. *Communications of the ACM*, 64(2), 76-83.
- Hochmuth, G. (2017). 5—Drip Irrigation. In M. D. Orzolek (Éd.), *A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture* (p. 79-105). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00005-1>
- Hodgkin, A. L., & Huxley, A. F. (1952). A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *The Journal of physiology*, 117(4), 500.
- Hof, A., & Wolf, N. (2014). Estimating potential outdoor water consumption in private urban landscapes by coupling high-resolution image analysis, irrigation water needs and evaporation estimation in Spain. *Landscape and Urban Planning*, 123, 61-72.
- Igor Ansoff, H. (1987). STRATEGIC MANAGEMENT OF TECHNOLOGY. *Journal of Business Strategy*, 7(3), 28-39. <https://doi.org/10.1108/eb039162>
- Intrigliolo, D. S., & Castel, J. R. (2009). Response of Vitis vinifera cv. ‘Tempranillo’ to partial rootzone drying in the field : Water relations, growth, yield and fruit and wine quality. *Agricultural Water Management*, 96(2), 282-292. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.08.001>
- Irmak, S. (2008). Evapotranspiration. In S. E. Jørgensen & B. D. Fath (Éds.), *Encyclopedia of Ecology* (p. 1432-1438). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00270-6>
- Irmak, S., Kranz, L., & VanDeWalle, B. (2006). Watermark Granular Matrix Sensor to Measure Soil Matric Potential for Irrigation Management. *The Board of Regents of the University of Nebraska on Behalf of the University of Nebraska-Lincoln Extension*, 8.
- Irmak, S., Payero, J., VanDeWalle, B., Rees, J., & Zoubek, G. (2014). Principles and Operational Characteristics of Watermark Granular Matrix Sensor to Measure Soil Water Status and Its Practical Applications for Irrigation Management in Various Soil Textures. *Biological Systems Engineering: Papers and Publications*. <https://digitalcommons.unl.edu/biosysengfacpub/332>
- ISBERIE, C. (1992). *Contribution du sol à l'alimentation hydrique d'un verger de cerisiers micro-irrigué selon un pilotage tensiométrique* [Thèse de doctorat]. Université de Montpellier II.
- Jackson, T., Mansfield, K., Saafi, M., Colman, T., & Romine, P. (2008). Measuring soil temperature and moisture using wireless MEMS sensors. *Measurement*, 41(4), 381-390. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2007.02.009>
- Joimel, S., Cortet, J., Jolivet, C. C., Saby, N. P. A., Chenot, E. D., Branchu, P., Consalès, J. N., Lefort, C., Morel, J. L., & Schwartz, C. (2016). Physico-chemical characteristics of topsoil for contrasted forest, agricultural, urban and industrial land uses in France. *Science of The Total Environment*, 545-546, 40-47. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.035>
- Jones, J. G., White, K. A. J., & Delgado-Charro, M. B. (2016). A mechanistic approach to modelling the formation of a drug reservoir in the skin. *Mathematical Biosciences*, 281, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.mbs.2016.08.007>
- Jourdan, C., & Rey, H. (1997). Modelling and simulation of the architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. *Plant and Soil*, 190(2), 217-233. <https://doi.org/10.1023/A:1004218030608>
- Jovanovic, Z., & Stikic, R. (2018). Partial Root-Zone Drying Technique : From Water Saving to the Improvement of a Fruit Quality. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 1. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2017.00003>
- Jullien, É., & Jullien, J. (2011). *Guide écologique du gazon et des pelouses fleuries*. Sang de la Terre/Groupe Eyrolles.

Références bibliographiques

- Kahneman, D., & Tversky, A. (1977). *Intuitive Prediction : Biases and Corrective Procedures*. DECISIONS AND DESIGNS INC MCLEAN VA. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA047747>
- Kang, C., Diverres, G., Karkee, M., Zhang, Q., & Keller, M. (2023). Decision-support system for precision regulated deficit irrigation management for wine grapes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 208, 107777. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107777>
- Karandish, F., & Shahnazari, A. (2016). Soil Temperature and Maize Nitrogen Uptake Improvement Under Partial Root-Zone Drying Irrigation. *Pedosphere*, 26(6), 872-886. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60092-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60092-3)
- Kast, R. (1993). *La théorie de la décision*. La Découverte Paris.
- Kellomäki, S., & Väistönen, H. (1997). Modelling the dynamics of the forest ecosystem for climate change studies in the boreal conditions. *Ecological Modelling*, 97(1), 121-140. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(96\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(96)00081-6)
- Kičić, M., Haase, D., Marin, A. M., Vučetić, D., & Krajter Ostojić, S. (2022). Perceptions of cultural ecosystem services of tree-based green infrastructure: A focus group participatory mapping in Zagreb, Croatia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 78, 127767. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127767>
- Kirda, C., & Kanber, R. (1999). Water, no longer a plentiful resource, should be used sparingly in irrigated agriculture. *Crop Yield Response to Deficit Irrigation.*, 1-20. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20001906361>
- Kirkham, M. B. (2023). Chapter 5—Tensiometers. In M. B. Kirkham (Ed.), *Principles of Soil and Plant Water Relations (Third Edition)* (p. 65-81). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95641-3.00008-8>
- Kjelgren, R., Rupp, L., & Kilgren, D. (2000). Water conservation in urban landscapes. *HortScience*, 35(6), 1037-1040.
- Klimanova, O. A., Bukvareva, E. N., Yu, K. E., & Illarionova, O. A. (2023). Assessing ecosystem services in Russia: Case studies from four municipal districts. *Land Use Policy*, 131, 106738. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106738>
- Knapp, A. K., Fay, P. A., Blair, J. M., Collins, S. L., Smith, M. D., Carlisle, J. D., Harper, C. W., Danner, B. T., Lett, M. S., & McCarron, J. K. (2002). Rainfall Variability, Carbon Cycling, and Plant Species Diversity in a Mesic Grassland. *Science*, 298(5601), 2202-2205. <https://doi.org/10.1126/science.1076347>
- Knowling, M. J., Bennett, B., Ostendorf, B., Westra, S., Walker, R. R., Pellegrino, A., Edwards, E. J., Collins, C., Pagay, V., & Grigg, D. (2021). Bridging the gap between data and decisions: A review of process-based models for viticulture. *Agricultural Systems*, 193, 103209. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103209>
- Koeser, A. K., Gilman, E. F., Paz, M., & Harchick, C. (2014). Factors influencing urban tree planting program growth and survival in Florida, United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(4), 655-661. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.06.005>
- Konijnendijk, C., Nilsson, K., Randrup, T., & Schipperijn, J. (2005). *Urban forests and trees : A reference book*. Springer.
- Kornyshova, E., & Deneckère, R. (2010). Decision-Making Ontology for Information System Engineering. In J. Parsons, M. Saeki, P. Shoval, C. Woo, & Y. Wand (Eds.), *Conceptual Modeling – ER 2010* (p. 104-117). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16373-9_8
- Koutsovili, E. I., Tzoraki, O., Kalli, A. A., Provatas, S., & Gaganis, P. (2023). Participatory approaches for planning nature-based solutions in flood vulnerable landscapes. *Environmental Science & Policy*, 140, 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.11.012>

Références bibliographiques

- Kovalenko, Y., Tindjau, R., Madilao, L. L., & Castellarin, S. D. (2021). Regulated deficit irrigation strategies affect the terpene accumulation in Gewürztraminer (*Vitis vinifera* L.) grapes grown in the Okanagan Valley. *Food Chemistry*, 341, 128172. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128172>
- Krause, J. (2008). A Bayesian approach to German agricultural yield expectations. *Agricultural Finance Review*, 68(1), 9-23. <https://doi.org/10.1108/00214660880001216>
- Kriedemann, P. E., & Goodwin, I. (2003). *Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying : An overview of principles and applications*. Land & Water Australia.
- Lan, T., Guo, S.-W., Han, J.-W., Yang, Y.-L., Zhang, K., Zhang, Q., Yang, W., & Li, P.-F. (2019). Evaluation of physical properties of typical urban green space soils in Binhai Area, Tianjin, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 44, 126430. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126430>
- Layke, C., Mapendembe, A., Brown, C., Walpole, M., & Winn, J. (2012). Indicators from the global and sub-global Millennium Ecosystem Assessments : An analysis and next steps. *Ecological Indicators*, 17, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.04.025>
- Lazarovitch, N., Kisekka, I., Oker, T. E., Brunetti, G., Wöhling, T., Xianyue, L., Yong, L., Skaggs, T. H., Furman, A., Sasidharan, S., Raij-Hoffman, I., & Šimůnek, J. (2023). Modeling of irrigation and related processes with HYDRUS. In *Advances in Agronomy*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2023.05.002>
- Lee, K. H., Barton, D. A. W., & Renson, L. (2023). Modelling of physical systems with a Hopf bifurcation using mechanistic models and machine learning. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 191, 110173. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110173>
- Lee, L. S. H., Zhang, H., & Jim, C. Y. (2021). Serviceable tree volume : An alternative tool to assess ecosystem services provided by ornamental trees in urban forests. *Urban Forestry & Urban Greening*, 59, 127003. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127003>
- Lehmann, A., & Stahr, K. (2007). Nature and significance of anthropogenic urban soils. *Journal of Soils and Sediments*, 7, 247-260.
- Lehnertz, M. (2022, août 25). *Réchauffement climatique à Liège : 3 camions-citernes désormais nécessaires pour arroser les jeunes arbres*. <https://www.rtbf.be/article/rechauffement-climatique-a-liege-3-camions-citernes-desormais-necessaires-pour-arroser-les-jeunes-arbres-11053289>
- Levinsson, A., van den Bosch, C. K., Öxell, C., & Fransson, A.-M. (2015). Visual assessments of establishment success in urban *Prunus avium* (L.) and *Quercus rubra* (L.) in relation to water status and crown morphological characteristics. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(2), 218-224. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.02.002>
- Li, S., Liu, Y., Her, Y., Chen, J., Guo, T., & Shao, G. (2021). Improvement of simulating sub-daily hydrological impacts of rainwater harvesting for landscape irrigation with rain barrels/cisterns in the SWAT model. *Science of The Total Environment*, 798, 149336. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149336>
- Li, Y., Guan, K., Yu, A., Peng, B., Zhao, L., Li, B., & Peng, J. (2019). Toward building a transparent statistical model for improving crop yield prediction : Modeling rainfed corn in the U.S. *Field Crops Research*, 234, 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.005>
- Li, Z. (2013). *Modeling of plant growth interacting with water resources and optimal control of irrigation scheduling* [Thèse de doctorat]. ECOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES « ECOLE CENTRALE PARIS ».
- Liebe, U., & Meyerhoff, J. (2021). Mapping potentials and challenges of choice modelling for social science research. *Journal of Choice Modelling*, 38, 100270. <https://doi.org/10.1016/j.jocm.2021.100270>

Références bibliographiques

- Litvak, E., Manago, K. F., Hogue, T. S., & Pataki, D. E. (2017). Evapotranspiration of urban landscapes in Los Angeles, California at the municipal scale. *Water Resources Research*, 53(5), 4236-4252. <https://doi.org/10.1002/2016WR020254>
- Litvak, E., & Pataki, D. E. (2016). Evapotranspiration of urban lawns in a semi-arid environment: An in situ evaluation of microclimatic conditions and watering recommendations. *Journal of Arid Environments*, 134, 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.06.016>
- Liu, R., Yang, Y., Wang, Y., Wang, X.-C., Rengel, Z., Zhang, W.-J., & Shu, L.-Z. (2020). Alternate partial root-zone drip irrigation with nitrogen fertigation promoted tomato growth, water and fertilizer-nitrogen use efficiency. *Agricultural Water Management*, 233, 106049. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106049>
- Livesley, S. J., McPherson, E. G., & Calfapietra, C. (2016). The Urban Forest and Ecosystem Services : Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution Cycles at the Tree, Street, and City Scale. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 119-124. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.11.0567>
- Locosselli, G. M., Camargo, E. P. de, Moreira, T. C. L., Todesco, E., Andrade, M. de F., André, C. D. S. de, André, P. A. de, Singer, J. M., Ferreira, L. S., Saldiva, P. H. N., & Buckeridge, M. S. (2019). The role of air pollution and climate on the growth of urban trees. *Science of The Total Environment*, 666, 652-661. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.291>
- Lohmann, S., Link, V., Marbach, E., & Negru, S. (2015). WebVOWL : Web-based Visualization of Ontologies. In P. Lamrix, E. Hyvönen, E. Blomqvist, V. Presutti, G. Qi, U. Sattler, Y. Ding, & C. Ghidini (Éds.), *Knowledge Engineering and Knowledge Management* (p. 154-158). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17966-7_21
- Lozet, J., & Mathieu, C. (1997). *Dictionnaire de science du sol, avec index anglais-français*.
- Ma, S., Wang, T., & Ma, S.-C. (2022). Effects of drip irrigation on root activity pattern, root-sourced signal characteristics and yield stability of winter wheat. *Agricultural Water Management*, 271, 107783. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107783>
- Mailhol, J. C., Zaïri, A., Slatni, A., Ben Nouma, B., & El Amani, H. (2004). Analysis of irrigation systems and irrigation strategies for durum wheat in Tunisia. *Agricultural Water Management*, 70(1), 19-37. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.06.001>
- Mailhol, J.-C., Albasha, R., Cheviron, B., Lopez, J.-M., Ruelle, P., & Dejean, C. (2018). The PILOTE-N model for improving water and nitrogen management practices : Application in a Mediterranean context. *Agricultural Water Management*, 204, 162-179. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.015>
- Mair, A., Dupuy, L., & Ptashnyk, M. (2023). Can root systems redistribute soil water to mitigate the effects of drought? *Field Crops Research*, 300, 109006. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109006>
- Maqsood, J., Farooque, A. A., Abbas, F., Esau, T., Wang, X., Acharya, B., & Afzaal, H. (2022). Application of Artificial Neural Networks to Project Reference Evapotranspiration Under Climate Change Scenarios. *Water Resources Management*, 36(3), 835-851. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02997-y>
- Marilleau, N. (2016). *Approches distribuées à base d'agents pour modéliser et simuler les systèmes complexes spatialisés* [Hdr]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01428319>
- Marsal, J., Rapoport, H. F., Manrique, T., & Girona, J. (2000). Pear fruit growth under regulated deficit irrigation in container-grown trees. *Scientia Horticulturae*, 85(4), 243-259. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00151-X](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00151-X)
- Masson, A. L., Caraglio, Y., Nicolini, E., Borianne, P., & Barczi, J.-F. (2022). Modelling the functional dependency between root and shoot compartments to predict the impact of

Références bibliographiques

- the environment on the architecture of the whole plant : Methodology for model fitting on simulated data using Deep Learning techniques. *in silico Plants*, 4(1), diab036. <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diab036>
- Mateos, L., González-Dugo, M. P., Testi, L., & Villalobos, F. J. (2013). Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation. *Agricultural water management*, 125, 81-91.
- Mathis, C.-F., & Pépy, E.-A. (2017). *La ville végétale, Une histoire de la nature en milieu urbain (France, XVIIe-XXIe siècle)* (Champ Vallon). <https://clio-cr.clionauts.org/la-ville-vegetale-une-histoire-de-la-nature-en-milieu-urbain-france-xviie-xxie-siecle.html>
- McAllister, A., Whitfield, D., & Abuzar, M. (2015). Mapping Irrigated Farmlands Using Vegetation and Thermal Thresholds Derived from Landsat and ASTER Data in an Irrigation District of Australia. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81(3), 229-238. <https://doi.org/10.14358/PERS.81.3.229-238>
- McCarthy, H. R., Pataki, D. E., & Jenerette, G. D. (2011). Plant water-use efficiency as a metric of urban ecosystem services. *Ecological Applications*, 21(8), 3115-3127. <https://doi.org/10.1890/11-0048.1>
- Mehdi, L., Weber, C., Pietro, F. D., & Selmi, W. (2012). Évolution de la place du végétal dans la ville, de l'espace vert à la trame verte. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Volume 12 Numéro 2, Article Volume 12 Numéro 2. <https://doi.org/10.4000/vertigo.12670>
- Meinard, Y., & Tsoukiàs, A. (2022). What Is Legitimate Decision Support? In S. Greco, V. Mousseau, J. Stefanowski, & C. Zopounidis (Éds.), *Intelligent Decision Support Systems : Combining Operations Research and Artificial Intelligence—Essays in Honor of Roman Słowiński* (p. 207-224). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96318-7_11
- Merchuk, J. C., Garcia-Camacho, F., & Molina-Grima, E. (2011). 2.18—Photobioreactors – Models of Photosynthesis and Related Effects. In M. Moo-Young (Éd.), *Comprehensive Biotechnology (Second Edition)* (p. 227-247). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00103-3>
- Merlin, P., & Choay, F. (1988). Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement. *Revue de Géographie Alpine*, 76(3), 304-305. https://www.persee.fr/doc/rga_0035-1121_1988_num_76_3_2716_t1_0304_0000_2
- Millennium ecosystem assessment, M. E. A. (2005). *Ecosystems and human well-being* (Vol. 5). Island press Washington, DC.
- Mingers, J., & Rosenhead, J. (2004). Problem structuring methods in action. *European Journal of Operational Research*, 152(3), 530-554. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00056-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00056-0)
- Ministère de la transition écologique. (2023). *Origine et gestion de la sécheresse*. Ministères Énergie Énergie Territoires. <https://www.ecologie.gouv.fr/secheresse>
- Minsky, M. (1965). *Matter, mind and models*.
- Mira-García, A. B., Romero-Trigueros, C., Gambín, J. M. B., Sánchez-Iglesias, M. del P., Tortosa, P. A. N., & Nicolás, E. N. (2023). Estimation of stomatal conductance by infrared thermometry in citrus trees cultivated under regulated deficit irrigation and reclaimed water. *Agricultural Water Management*, 276, 108057. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108057>
- Mitchell, B. (2005). Participatory Partnerships : Engaging and Empowering to Enhance Environmental Management and Quality of Life? *Social Indicators Research*, 71(1), 123-144. <https://doi.org/10.1007/s11205-004-8016-0>

Références bibliographiques

- Mohamadzade, F., Gheysari, M., & Kiani, M. (2021). Root adaptation of urban trees to a more precise irrigation system : Mature olive as a case study. *Urban Forestry & Urban Greening*, 60, 127053. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127053>
- Montague, T., McKenney, C., Maurer, M., & Winn, B. (2007). Influence of irrigation volume and mulch on establishment of select shrub species. *Arboriculture and Urban Forestry*, 33(3), 202.
- Moody, R., Geron, N., Healy, M., Rogan, J., & Martin, D. (2021). Modeling the spatial distribution of the current and future ecosystem services of urban tree planting in Chicopee and Fall River, Massachusetts. *Urban Forestry & Urban Greening*, 66, 127403. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127403>
- Moretti, S., Öztürk, M., & Tsoukiàs, A. (2016). Preference Modelling. In S. Greco, M. Ehrgott, & J. R. Figueira (Éds.), *Multiple Criteria Decision Analysis : State of the Art Surveys* (p. 43-95). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_3
- Motilva, M. J., Tovar, M. J., Romero, M. P., Alegre, S., & Girona, J. (2000). Influence of regulated deficit irrigation strategies applied to olive trees (Arbequina cultivar) on oil yield and oil composition during the fruit ripening period. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(14), 2037-2043.
- Navarro-Hellín, H., Martínez-del-Rincon, J., Domingo-Miguel, R., Soto-Valles, F., & Torres-Sánchez, R. (2016). A decision support system for managing irrigation in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124, 121-131. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.003>
- Navinkumar, T. M., Ranjith Kumar, R., & Gokila, P. V. (2021). Application of artificial intelligence techniques in irrigation and crop health management for crop yield enhancement. *Materials Today: Proceedings*, 45, 2248-2253. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.227>
- Neuenschwander, N., Wissen Hayek, U., & Grêt-Regamey, A. (2014). Integrating an urban green space typology into procedural 3D visualization for collaborative planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 48, 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.comenvurbsys.2014.07.010>
- Nguyen, Q.-D., Roussey, C., Poveda-Villalón, M., de Vaulx, C., & Chanet, J.-P. (2020). Development Experience of a Context-Aware System for Smart Irrigation Using CASO and IRRIG Ontologies. *Applied Sciences*, 10(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/app10051803>
- Norman, J. M., Anderson, M. C., & Kustas, W. P. (2022). Soil–plant–atmosphere continuum★. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00103-8>
- Nouna, B. B., & Rezig, M. (2016). *The Partial Root-Zone Drying Irrigation Technique (PRD) : An analysis of the theoretical and practical aspects*.
- Nouri, H., Beecham, S., Kazemi, F., & Hassanli, A. M. (2013). A review of ET measurement techniques for estimating the water requirements of urban landscape vegetation. *Urban Water Journal*, 10(4), 247-259. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2012.726360>
- Nouri, H., Glenn, E. P., Beecham, S., Chavoshi Boroujeni, S., Sutton, P., Alaghmand, S., Noori, B., & Nagler, P. (2016). Comparing Three Approaches of Evapotranspiration Estimation in Mixed Urban Vegetation : Field-Based, Remote Sensing-Based and Observational-Based Methods. *Remote Sensing*, 8(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/rs8060492>
- Nowak, D. J. (2018). Les effets des arbres et de la forêt sur la qualité de l'air et la santé humaine dans et autour des zones urbaines. *AgroParisTech*, 297-308.

Références bibliographiques

- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A., & Greenfield, E. (2014). Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution*, 193, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.05.028>
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Doyle, M., McGovern, M., & Pasher, J. (2018). Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.10.019>
- O'Brien, L. E., Urbanek, R. E., & Gregory, J. D. (2022). Ecological functions and human benefits of urban forests. *Urban Forestry & Urban Greening*, 75, 127707. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127707>
- OMM. (2022). *Le Rapport sur l'état des ressources en eau dans le monde renseigne sur les cours d'eau, le stockage des eaux terrestres et les glaciers* (291122). <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/le-rapport-sur-l%20E2%80%99%C3%A9tat-des-ressources-en-eau-dans-le-monde-renseigne-sur>
- ONU. (1992). *DÉCLARATION DE RIO SUR L'ENVIRONNEMENT ET LE DÉVELOPPEMENT
PRINCIPES DE GESTION DES FORêTS*. <https://www.un.org/french/events/rio92/rio-fp.htm>
- Padullés Cubino, J., Kirkpatrick, J. B., & Vila Subirós, J. (2017). Do water requirements of Mediterranean gardens relate to socio-economic and demographic factors? *Urban Water Journal*, 14(4), 401-408. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2016.1173219>
- PAGES, L., & ARIES, F. (1988). SARAH : Modèle de simulation de la croissance, du développement et de l'architecture des systèmes racinaires. *Agronomie*, 8(10), 889-896. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00885058>
- Pagès, L., Bernert, M., & Pagès, G. (2020). Modelling time variations of root diameter and elongation rate as related to assimilate supply and demand. *Journal of Experimental Botany*, 71(12), 3524-3534. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa122>
- Pahuja, R. (2022). Development of semi-automatic recalibration system and curve-fit models for smart soil moisture sensor. *Measurement*, 203, 111907. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111907>
- Paramasivam, S., Alva, A. K., & Fares, A. (2000). AN EVALUATION OF SOIL WATER STATUS USING TENSIOMETERS IN A SANDY SOIL PROFILE UNDER CITRUS PRODUCTION1. *Soil Science*, 165(4), 343. https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/2000/04000/AN_EVALUATION_OF_SOI_L_WATER_STATUS_USING.5.aspx
- Parés-Franzi, M., Saurí-Pujol, D., & Domene, E. (2006). Evaluating the Environmental Performance of Urban Parks in Mediterranean Cities : An Example from the Barcelona Metropolitan Region. *Environmental Management*, 38(5), 750-759. <https://doi.org/10.1007/s00267-005-0197-z>
- Pärn, K. (2022). Modelling. *The Companion to Juri Lotman*. <https://www.academia.edu/78052457/Modelling>
- Patil, P., & Desai, B. L. (2013). Intelligent irrigation control system by employing wireless sensor networks. *International Journal of Computer Applications*, 79(11).
- Patil, S., Ramgir, N., Mukherji, S., & Rao, V. R. (2017). PVA modified ZnO nanowire based microsensors platform for relative humidity and soil moisture measurement. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 253, 1071-1078. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.07.053>
- Pauleit, S., Jones, N., Garcia-Martin, G., Garcia-Valdecantos, J. L., Rivière, L. M., Vidal-Beaudet, L., Bodson, M., & Randrup, T. B. (2002). Tree establishment practice in towns and cities – Results from a European survey. *Urban Forestry & Urban Greening*, 1(2), 83-96. <https://doi.org/10.1078/1618-8667-00009>

Références bibliographiques

- Peng, X., Li, J., Sun, L., Gao, Y., Cao, M., & Luo, J. (2022). Impacts of water deficit and post-drought irrigation on transpiration rate, root activity, and biomass yield of *Festuca arundinacea* during phytoextraction. *Chemosphere*, 294, 133842. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133842>
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032), 120-145.
- Perrings, C., Folke, C., & Mäler, K.-G. (1992). The ecology and economics of biodiversity loss : The research agenda. *Ambio*, 201-211.
- Pinto-Correia, T., Ribeiro, N., & Sá-Sousa, P. (2011). Introducing the montado, the cork and holm oak agroforestry system of Southern Portugal. *Agroforestry Systems*, 82(2), 99. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9388-1>
- plante & cité. (2023). *Qui sommes-nous ? - Plante & Cité*. <https://www.plante-et-cite.fr/n/qui-sommes-nous/n:12>
- Potier, A., Rousselière, C., Eychenié, H., Clarenne, J., & Collomp, R. (2023). Intégrer les systèmes d'aide à la décision pharmaceutique dans les pratiques de pharmacie clinique. Pourquoi ? Comment ? *Le Pharmacien Clinicien*, 58(3), 261-263. <https://doi.org/10.1016/j.phacli.2023.05.009>
- Pramanik, M., Khanna, M., Singh, M., Singh, D. K., Sudhishri, S., Bhatia, A., & Ranjan, R. (2022). Automation of soil moisture sensor-based basin irrigation system. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2021.100032>
- Pretzsch, H., Forrester, D. I., & Rötzer, T. (2015). Representation of species mixing in forest growth models. A review and perspective. *Ecological Modelling*, 313, 276-292. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.06.044>
- Puhlmann, H., Schmidt-Walter, P., Hartmann, P., Meesenburg, H., & von Wilpert, K. (2019). Soil water budget and drought stress. *Status and Dynamics of Forests in Germany: Results of the National Forest Monitoring*, 55-91.
- Puyal, M., Chevalier, H., Renaud, & Pitaud. (2022). *Evaluation de différentes méthodes d'estimation du taux*. <https://www6.inrae.fr/renfor/Ressources/Articles-techniques/Protocole-constat-de-reprise>
- Radoglou, K., & Raftoyannis, Y. (2002). The impact of storage, desiccation and planting date on seedling quality and survival of woody plant species. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 75(2), 179-190. <https://doi.org/10.1093/forestry/75.2.179>
- Rahman, M. A., Moser, A., Rötzer, T., & Pauleit, S. (2017). Within canopy temperature differences and cooling ability of *Tilia cordata* trees grown in urban conditions. *Building and Environment*, 114, 118-128.
- Ramalan, A. A., & Hill, R. W. (2000). Strategies for water management in gravity sprinkle irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 43(1), 51-74. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(99\)00046-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(99)00046-3)
- Rambhia, M., Volk, R., Rismanchi, B., Winter, S., & Schultmann, F. (2023). Supporting decision-makers in estimating irrigation demand for urban street trees. *Urban Forestry & Urban Greening*, 82, 127868. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127868>
- Rao, S. S., Tanwar, S. P. S., & Regar, P. L. (2016). Effect of deficit irrigation, phosphorous inoculation and cycocel spray on root growth, seed cotton yield and water productivity of drip irrigated cotton in arid environment. *Agricultural Water Management*, 169, 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.008>
- Rietveld, W. J. (1989). Transplanting Stress in Bareroot Conifer Seedlings : Its Development and Progression to Establishment. *Northern Journal of Applied Forestry*, 6(3), 99-107. <https://doi.org/10.1093/njaf/6.3.99>

Références bibliographiques

- Roman, L. A., & Scatena, F. N. (2011). Street tree survival rates : Meta-analysis of previous studies and application to a field survey in Philadelphia, PA, USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 10(4), 269-274.
- Romanovska, P., Schauberger, B., & Gornott, C. (2023). Wheat yields in Kazakhstan can successfully be forecasted using a statistical crop model. *European Journal of Agronomy*, 147, 126843. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126843>
- Romera, A. J., Morris, S. T., Hodgson, J., Stirling, W. D., & Woodward, S. J. R. (2004). A model for simulating rule-based management of cow-calf systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 42(2), 67-86. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(03\)00118-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(03)00118-2)
- Romero, P., Botia, P., & Garcia, F. (2004). Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on vegetative development and yield of mature almond trees. *Plant and Soil*, 260(1), 169-181. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000030193.23588.99>
- Romero-Conde, A., Kusakabe, A., & Melgar, J. C. (2014). Physiological responses of citrus to partial rootzone drying irrigation. *Scientia Horticulturae*, 169, 234-238. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.02.022>
- Ronna, A. (1888). *Les irrigations* (Vol. 1). Firmin-Didot et cie.
- Roy, B. (1985). Méthodologie multicritère d'aide à la décision. *Editions Economica*.
- Roy, B. (1993). Decision science or decision-aid science? *European journal of operational research*, 66(2), 184-203.
- Roy, B. (2016). Paradigms and Challenges. In S. Greco, M. Ehrgott, & J. R. Figueira (Eds.), *Multiple Criteria Decision Analysis : State of the Art Surveys* (p. 19-39). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_2
- Ruaud, M., Hamelin, C., BENSAOUD, A., Sarraih, D., Macret, J., Triollet, régis, Girard, A., Damas, O., & Verfaillie, T. (2013). *Étude sur la gestion raisonnée de l'arrosage en espaces verts État des lieux des pratiques et perspectives d'évolution Stratégies d'économie de la ressource en eau*. Plante & Cité. <https://www.plante-et-cite.fr/ressource/fiche/97/Etude-sur-la-gestion-raisonnee-de-l-arrosage-en-espaces-verts-Etat-des-lieux-des-pratiques-et-perspectives-d-evolution-strategies-d-economie-de-la-ressource-en-eau>
- Saad, A. M., Elhabbak, A. K., Abbas, M. H. H., Mohamed, I., AbdelRahman, M. A. E., Scopa, A., & Bassouny, M. A. (2023). Can deficit irrigations be an optimum solution for increasing water productivity under arid conditions? A case study on wheat plants. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 30(2), 103537. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103537>
- Saher, R., Stephen, H., & Ahmad, S. (2021). Urban evapotranspiration of green spaces in arid regions through two established approaches : A review of key drivers, advancements, limitations, and potential opportunities. *Urban Water Journal*, 18(2), 115-127. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1857796>
- Salvador, R., Bautista-Capetillo, C., & Playán, E. (2011). Irrigation performance in private urban landscapes : A study case in Zaragoza (Spain). *Landscape and Urban Planning*, 100(3), 302-311. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.12.018>
- Sánchez-Blanco, M. J., Ortuño, M. F., Bañon, S., & Álvarez, S. (2019). Deficit irrigation as a strategy to control growth in ornamental plants and enhance their ability to adapt to drought conditions. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 94(2), 137-150. <https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1570353>
- Santos-Gomez, L., & Darnell, M. J. (1992). Empirical evaluation of decision tables for constructing and comprehending expert system rules. *Knowledge Acquisition*, 4(4), 427-444. [https://doi.org/10.1016/1042-8143\(92\)90004-K](https://doi.org/10.1016/1042-8143(92)90004-K)

Références bibliographiques

- Scheiber, S. M., & Richard C. Beeson. (2007). Landscape Growth and Aesthetic Quality of Coleus Managed with Irrigation Deficits. *HortTechnology*, 17(4), 561-566. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.17.4.561>
- Schlosser, C. A., Strzepek, K., Gao, X., Fant, C., Blanc, É., Paltsev, S., Jacoby, H., Reilly, J., & Gueneau, A. (2014). The future of global water stress : An integrated assessment. *Earth's Future*, 2(8), 341-361. <https://doi.org/10.1002/2014EF000238>
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing : I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84(1), 1-66. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.1.1>
- Schütt, A., Becker, J. N., Gröngröft, A., Schaaf-Titel, S., & Eschenbach, A. (2022). Soil water stress at young urban street-tree sites in response to meteorology and site parameters. *Urban Forestry & Urban Greening*, 75, 127692. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127692>
- Schwartz, C., Séré, G., Stas, M., Blanchart, A., Morel, J.-L., & Consalès, J.-N. (2015). Quelle ressource Sol dans les villes pour quels services et quels aménagements? *Innovations Agronomiques*, 45, 1-11.
- Selmi, W. (2014). *Services écosystémiques rendus par la végétation urbaine Application d'approches d'évaluation à la ville de Strasbourg* [Thèse de doctorat]. Université de Strasbourg.
- Sercombe, J., Michel, B., Riglet-Martial, C., & Fandeur, Olivier. (2020). 2.14—Modeling of Pellet Cladding Interaction☆. In R. J. M. Konings & R. E. Stoller (Éds.), *Comprehensive Nuclear Materials (Second Edition)* (p. 417-465). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.00715-3>
- Serraj, R., Kumar, A., McNally, K. L., Slamet-Loedin, I., Bruskiewich, R., Mauleon, R., Cairns, J., & Hijmans, R. J. (2009). Chapter 2—Improvement of Drought Resistance in Rice. In D. L. Sparks (Éd.), *Advances in Agronomy* (Vol. 103, p. 41-99). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(09\)03002-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(09)03002-8)
- Shanker Srivastava, H., & Patel, P. (2022). Chapter 22 - Radar remote sensing of soil moisture : Fundamentals, challenges & way-out. In P. K. Srivastava, D. K. Gupta, T. Islam, D. Han, & R. Prasad (Éds.), *Radar Remote Sensing* (p. 405-445). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823457-0.00022-7>
- Sharma, V. (2018). *Methods and techniques for soil moisture monitoring*. University of Wyoming Extension.
- Sherman, A. R., Kane, B., Autio, W. A., Harris, J. R., & Ryan, H. D. P. (2016). Establishment period of street trees growing in the Boston, MA metropolitan area. *Urban Forestry & Urban Greening*, 19, 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.07.006>
- Shishkova, S., Rost, T. L., & Dubrovsky, J. G. (2008). Determinate Root Growth and Meristem Maintenance in Angiosperms. *Annals of Botany*, 101(3), 319-340. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm251>
- Shojaei, P., Gheysari, M., Myers, B., & Esmaeili, H. (2020). Quantifying microclimatic conditions : An attempt to more accurately estimate urban landscape water requirements. *Urban Forestry & Urban Greening*, 54, 126767. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126767>
- Silva, L. C. R., & Lambers, H. (2018). Chapter Two - Soil–Plant–Atmosphere Interactions : Ecological and Biogeographical Considerations for Climate-Change Research. In W. R. Horwath & Y. Kuzyakov (Éds.), *Developments in Soil Science* (Vol. 35, p. 29-60). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63865-6.00002-8>
- Simon, H. A. (1956). Rational choice and the structure of the environment. *Psychological review*, 63(2), 129.

Références bibliographiques

- Simon, H. A. (1979). Rational decision making in business organizations. *The American economic review*, 69(4), 493-513.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th., & Šejna, M. (2016). Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. *Vadose Zone Journal*, 15(7), 0. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.04.0033>
- Sinclair, T. R., Wherley, B. G., Dukes, M. D., & Cathey, S. E. (2014). Penman's sink-strength model as an improved approach to estimating plant canopy transpiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 197, 136-141. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.06.012>
- Singh, M., Singh, S., Deb, S., & Ritchie, G. (2023). Root distribution, soil water depletion, and water productivity of sweet corn under deficit irrigation and biochar application. *Agricultural Water Management*, 279, 108192. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108192>
- Slamini, M., Sbaa, M., Arabi, M., & Darmous, A. (2022). Review on Partial Root-zone Drying irrigation : Impact on crop yield, soil and water pollution. *Agricultural Water Management*, 271, 107807. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107807>
- Sojoodi, Z., & Mirzaei, F. (2019). Evaluation of the WUCOLS Method for Estimating Water Requirements of Landscape Plants. *Journal of Water Research in Agriculture*, 33(4), 629-643. <https://doi.org/10.22092/jwra.2020.121243>
- Sousa-Silva, R., Duflos, M., Ordóñez Barona, C., & Paquette, A. (2023). Keys to better planning and integrating urban tree planting initiatives. *Landscape and Urban Planning*, 231, 104649. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104649>
- Spreer, W., Nagle, M., Neidhart, S., Carle, R., Ongprasert, S., & Müller, J. (2007). Effect of regulated deficit irrigation and partial rootzone drying on the quality of mango fruits (*Mangifera indica* L., cv. 'Chok Anan'). *Agricultural Water Management*, 88(1), 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.10.012>
- Srinivasan, M. S., Measures, R., Muller, C., Neal, M., Rajanayaka, C., Shankar, U., & Elley, G. (2021). Comparing the water use metrics of just-in-case, just-in-time and justified irrigation strategies using a scenario-based tool. *Agricultural Water Management*, 258, 107221. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107221>
- Stanhill, G. (2005). EVAPOTRANSPIRATION. In D. Hillel (Éd.), *Encyclopedia of Soils in the Environment* (p. 502-506). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00359-3>
- sTREEt. (2021). *sTREEt – Projet ANR sTREEt 2019-2024*. <https://street.cnrs.fr/>
- Struve, D. K. (2009). Tree establishment : A review of some of the factors affecting transplant survival and establishment. *Arboriculture & Urban Forestry*, 35(1), unpaginated. CABDirect. http://joa.isa-arbor.com/browse.asp?Journals_ID=1
- Struve, D. K., & Joly, R. J. (1992). Transplanted red oak seedlings mediate transplant shock by reducing leaf surface area and altering carbon allocation. *Canadian Journal of Forest Research*, 22(10), 1441-1448. <https://doi.org/10.1139/x92-194>
- Sun, H., Kopp, K., & Kjelgren, R. (2012). Water-efficient urban landscapes : Integrating different water use categorizations and plant types. *HortScience*, 47(2), 254-263.
- Szturc, J., Ośródka, K., Jurczyk, A., Otop, I., Linkowska, J., Bochenek, B., & Pasierb, M. (2022). Chapter 3—Quality control and verification of precipitation observations, estimates, and forecasts. In S. Michaelides (Éd.), *Precipitation Science* (p. 91-133). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822973-6.00002-0>
- Tamura, H., Yamamoto, K., Tomiyama, S., & Hatono, I. (2000). Modeling and analysis of decision making problem for mitigating natural disaster risks. *European Journal of Operational Research*, 122(2), 461-468. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00247-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00247-7)

Références bibliographiques

- Tapparo, S. A., Coelho, R. D., de Oliveira Costa, J., & Chaves, S. W. P. (2019). Growth and establishment of irrigated lawns under fixed management conditions. *Scientia Horticulturae*, 256, 108580. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108580>
- Thomsen, S., Reisdorff, C., Gröngröft, A., Jensen, K., & Eschenbach, A. (2020). “Responsiveness of mature oak trees (*Quercus robur L.*) to soil water dynamics and meteorological constraints in urban environments”. *Urban Ecosystems*, 23(1), 173-186. <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00908-z>
- Timsina, J., & Weerahewa, J. (2023). Restoring ancient irrigation systems for sustainable agro-ecosystems development : Reflections on the special issue. *Agricultural Systems*, 209, 103668. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103668>
- Tron, G., Isbérie, C., & Chol, P. (2013). *La tensiométrie pour piloter les irrigations : Une utilisation raisonnée de la ressource en eau*. Educagri éditions.
- Tron, G., ISBERIE, C., & Chol, P. (2013). *Tensiométrie pour piloter les irrigations,une utilisation raisonnée de la ressource en eau*. Educagri éditions.
- Tsoukiàs, A. (2006). De la théorie de la décision à l'aide à la décision. *D. Bouyssou, D. Dubois, M. Pirlot, & H. Prade, Concepts et méthodes pour l'aide à la décision*, 1.
- Tsoukiàs, A. (2007). On the concept of decision aiding process : An operational perspective. *Annals of Operations Research*, 154(1), 3-27. <https://doi.org/10.1007/s10479-007-0187-z>
- Tsoukiàs, A., Maudet, N., & Ouerdane, W. (2010). Argumentation Theory and Decision Aiding. *International Series in Operations Research & Management Science*, 177-208. https://www.academia.edu/19780419/Argumentation_Theory_and_Decision_Aiding
- Tsouni, A., Kontoes, C., Koutsoyiannis, D., Elias, P., & Mamassis, N. (2008). Estimation of actual evapotranspiration by remote sensing : Application in Thessaly Plain, Greece. *Sensors*, 8(6), 3586-3600.
- Tufféry, S. (2017). *Data mining et statistique décisionnelle : La science des données* (5e éd. actualisée et augmentée). Éditions Technip.
- UNEP. (2020). *Le palmarès des villes les plus vertes de France*. UNEP. <https://www.lesentreprisesdupaysage.fr/tout-savoir-sur-les-bienfaits-du-vegetal/le-palmares/>
- UNEP. (2022). *Gestion de l'eau : Mettre en place des solutions durables pour arroser les végétaux*. UNEP. <https://www.lesentreprisesdupaysage.fr/a-propos-de-lunep/nos-actions-d-influence/gestion-de-leau-mettre-en-place-des-solutions-durables-pour-arroser-les-vegetaux/>
- UNEP. (2023). *Gestion de l'eau : Mettre en place des solutions durables pour arroser les végétaux*. UNEP. <https://www.lesentreprisesdupaysage.fr/a-propos-de-lunep/nos-actions-d-influence/gestion-de-leau-mettre-en-place-des-solutions-durables-pour-arroser-les-vegetaux/>
- Ungaro, F., Maienza, A., Ugolini, F., Lanini, G. M., Baronti, S., & Calzolari, C. (2022). Assessment of joint soil ecosystem services supply in urban green spaces : A case study in Northern Italy. *Urban Forestry & Urban Greening*, 67, 127455. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127455>
- Vanderborght, J., de Jong van Lier, Q., Schnepf, A., & Javaux, M. (2023). Plant-soil-water relations☆. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00254-8>
- van Klompenburg, T., Kassahun, A., & Catal, C. (2020). Crop yield prediction using machine learning : A systematic literature review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, 105709. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105709>

Références bibliographiques

- van Riel, N. A. W. (2006). Dynamic modelling and analysis of biochemical networks : Mechanism-based models and model-based experiments. *Briefings in Bioinformatics*, 7(4), 364-374. <https://doi.org/10.1093/bib/bbl040>
- Varenne, F., Silberstein, M., & Dutreuil, S. (2018). *Modéliser et simuler : Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation. Tome 2* (Vol. 2). Éditions Matériologiques.
- Varga, S., Cholakova, M., Jansen, J. J. P., Mom, T. J. M., & Kok, G. J. M. (2023). From platform growth to platform scaling : The role of decision rules and network effects over time. *Journal of Business Venturing*, 38(6), 106346. <https://doi.org/10.1016/j.jbusvent.2023.106346>
- Veerkamp, C. J., Schipper, A. M., Hedlund, K., Lazarova, T., Nordin, A., & Hanson, H. I. (2021). A review of studies assessing ecosystem services provided by urban green and blue infrastructure. *Ecosystem Services*, 52, 101367. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101367>
- Vera, J., Conejero, W., Mira-García, A. B., Conesa, M. R., & Ruiz-Sánchez, M. C. (2021). Towards irrigation automation based on dielectric soil sensors. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 96(6), 696-707. <https://doi.org/10.1080/14620316.2021.1906761>
- Vico, G., Revelli, R., & Porporato, A. (2014). Ecohydrology of street trees : Design and irrigation requirements for sustainable water use. *Ecohydrology*, 7(2), 508-523. <https://doi.org/10.1002/eco.1369>
- Wang, D., Kang, Y., & Wan, S. (2007). Effect of soil matric potential on tomato yield and water use under drip irrigation condition. *Agricultural Water Management*, 87(2), 180-186. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.06.021>
- Wang, F., Meng, H., Xie, R., Wang, K., Ming, B., Hou, P., Xue, J., & Li, S. (2023). Optimizing deficit irrigation and regulated deficit irrigation methods increases water productivity in maize. *Agricultural Water Management*, 280, 108205. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108205>
- Wang, K., & Dickinson, R. E. (2012). A review of global terrestrial evapotranspiration : Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, 50(2). <https://doi.org/10.1029/2011RG000373>
- Wang, Y., Chang, Q., & Li, X. (2021). Promoting sustainable carbon sequestration of plants in urban greenspace by planting design : A case study in parks of Beijing. *Urban Forestry & Urban Greening*, 64, 127291. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127291>
- WANIA, A. (2007). *Urban vegetation : Detection and function evaluation for air quality assessment*. <https://ecrin.app.unistra.fr/search/notice/view/oai%3AEPrintsUneraTest01%3A1442>
- Wanniarachchi, S., & Sarukkalige, R. (2022). A review on evapotranspiration estimation in agricultural water management : Past, present, and future. *Hydrology*, 9(7), 123.
- Watson, G., & Hewitt, A. (2020). Large trees establish more rapidly when transplanted bare root. *Arboricultural Journal*, 42(2), 117-126. <https://doi.org/10.1080/03071375.2020.1765609>
- Watson, G. W., Himelick, E. B., & Smiley, E. T. (1986). Twig growth of eight species of shade trees following transplanting. *Journal of Arboriculture*, 12(10), 241-245.
- Wattenhofer, D. J., & Johnson, G. R. (2021). Understanding why young urban trees die can improve future success. *Urban Forestry & Urban Greening*, 64, 127247. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127247>
- Wei, L., Du, H., Mahesar, Q., Al Ammari, K., Magee, D. R., Clarke, B., Dimitrova, V., Gunn, D., Entwistle, D., Reeves, H., & Cohn, A. G. (2020). A decision support system for urban infrastructure inter-asset management employing domain ontologies and

Références bibliographiques

- qualitative uncertainty-based reasoning. *Expert Systems with Applications*, 158, 113461. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113461>
- Widney, S., Fischer, B. C., & Vogt, J. (2016). Tree Mortality Undercuts Ability of Tree-Planting Programs to Provide Benefits : Results of a Three-City Study. *Forests*, 7(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/f7030065>
- Wilkin, T., Stott, A., Lin, J. L., Pate, J., McEwen, A., Verhagen, A., & Turbitt, E. (2023). Free Online Decision Tools to Support Parents Making Decisions About Their Children's Chronic Health Condition : An Environmental Scan. *Academic Pediatrics*, 23(5), 874-883. <https://doi.org/10.1016/j.acap.2023.02.002>
- Winterfeldt, D. von. (1980). Structuring decision problems for decision analysis. *Acta Psychologica*, 45(1), 71-93. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(80\)90022-0](https://doi.org/10.1016/0001-6918(80)90022-0)
- Woolery, P. O., & Jacobs, D. F. (2014). Planting stock type and seasonality of simulated browsing affect regeneration establishment of *Quercus rubra*. *Canadian Journal of Forest Research*, 44(7), 732-739. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0492>
- Wu, Y., Wang, H., Yang, X., Meng, Z., & He, D. (2017). Soil Water Effect on Root Activity, Root Weight Density, and Grain Yield in Winter Wheat. *Crop Science*, 57(1), 437-443. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.11.0704>
- Xing, L., Zhao, L., Cui, N., Liu, C., Guo, L., Du, T., Wu, Z., Gong, D., & Jiang, S. (2023). Apple tree transpiration estimated using the Penman-Monteith model integrated with optimized jarvis model. *Agricultural Water Management*, 276, 108061. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108061>
- Yang, J.-J., Kim, G.-T., & Lee, T. J. (2012). Parks as leisure spaces for older adults' daily wellness : A Korean case study. *Annals of Leisure Research*, 15(3), 277-295.
- Yang, X.-S. (2017). Chapter 28—Mathematical Modeling. In X.-S. Yang (Éd.), *Engineering Mathematics with Examples and Applications* (p. 325-340). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809730-4.00037-9>
- Yu, L., Gao, W., R. Shamshiri, R., Tao, S., Ren, Y., Zhang, Y., & Su, G. (2021). *Review of research progress on soil moisture sensor technology*. <https://oa.tib.eu/renate/handle/123456789/11011>
- Zakharova, L., Meyer, K. M., & Seifan, M. (2019). Trait-based modelling in ecology : A review of two decades of research. *Ecological Modelling*, 407, 108703. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.05.008>
- Zegbe-Domínguez, J. A., Behboudian, M. H., Lang, A., & Clothier, B. E. (2003). Deficit irrigation and partial rootzone drying maintain fruit dry mass and enhance fruit quality in 'Petopride' processing tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill.). *Scientia Horticulturae*, 98(4), 505-510. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(03\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(03)00036-0)
- Zegeye, G., Erifo, S., Addis, G., & Gebre, G. G. (2023). Economic valuation of urban forest using contingent valuation method : The case of Hawassa city, Ethiopia. *Trees, Forests and People*, 12, 100398. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100398>
- Zhang, C., & Li, X. (2021). Using saline water drip irrigation and soil matric potential control for tree establishment in coastal saline soil. *Ecological Engineering*, 170, 106337. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106337>
- Zhang, J., Wang, Q., Xia, G., Wu, Q., & Chi, D. (2021). Continuous regulated deficit irrigation enhances peanut water use efficiency and drought resistance. *Agricultural Water Management*, 255, 106997. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106997>
- Zhao, F., & Liu, Y. (2021). Important meteorological predictors for long-range wildfires in China. *Forest Ecology and Management*, 499, 119638. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119638>
- Zhu, Y., Irmak, S., Jhala, A. J., Vuran, M. C., & Diotto, A. (2019). Time-domain and frequency-domain reflectometry type soil moisture sensor performance and soil

Références bibliographiques

temperature effects in fine-and coarse-textured soils. *Applied Engineering in Agriculture*, 35(2), 117-134.

