



HAL
open science

Identification et essais de techniques biochimiques de devitalisation sur des essences ligneuses générant des risques sur les ouvrages hydrauliques

Julie Macia

► To cite this version:

Julie Macia. Identification et essais de techniques biochimiques de devitalisation sur des essences ligneuses générant des risques sur les ouvrages hydrauliques. Sciences agricoles. Université d'Avignon, 2018. Français. NNT : 2018AVIG0342 . tel-03581554v2

HAL Id: tel-03581554

<https://theses.hal.science/tel-03581554v2>

Submitted on 20 Feb 2022

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.

**Identification et essais de techniques de dévitalisation
des essences ligneuses générant des risques
sur les ouvrages hydrauliques**

THÈSE présentée par

Julie Macia

Préparée au sein de l'Unité de Recherche 407 de Pathologie Végétale

Dirigée par Cindy Morris

Co-dirigée par Caroline Zanetti

Soutenue à huit-clos le 19 février 2018

Pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse

Jury

Annabel PORTE	DR, UMR 1202 BIOGECO, INRA-Univ, Bordeaux	Rapporteur
Ivan SACHE	PR, AgroParisTech, UFR EAI, Paris	Rapporteur
Marc BARDIN	DR, DU de l'UR 407 Pathologie Végétale, INRA-PACA, Avignon	Examineur
Olivier BAUDRY	Professeur - Université Catholique de Louvain / Earth and Life Institute, Belgique	Examineur
Philippe NICOT	CR, UR 407 Pathologie Végétale, INRA-PACA, Avignon	Examineur
Jacques TASSIN	CR, UPR 105 Forêts et Sociétés, CIRAD, Montpellier	Examineur
Cindy MORRIS	DR, UR 407 Pathologie Végétale, INRA-PACA, Avignon	Directeur de thèse
Caroline ZANETTI	CEO ARBEAUSOLutions, Belcodène	Co-encadrante

Titre : Identification et essais de techniques de dévitalisation des essences ligneuses générant des risques sur les ouvrages hydrauliques**Résumé**

La végétation ligneuse implantée sur les digues et barrages est bien connue pour ses nombreux effets positifs tels que la stabilisation des berges, le maintien de la biodiversité, l'ombrage des pistes, etc. Ainsi, les gestionnaires ont laissé les arbres se développer sur leurs ouvrages. Mais de récentes études ont montré que les arbres et plus particulièrement leur système racinaire pouvaient causer divers dégâts comme des soulèvements, des fissurations et des destructurations pouvant entraîner différents risques pour les ouvrages hydrauliques (érosions internes et externes). Un renforcement des réglementations portant sur les digues et barrages a obligé les gestionnaires et propriétaires à assurer le contrôle, le suivi technique et l'entretien de leurs ouvrages. De plus, les réglementations portant sur l'utilisation des produits phytosanitaires ont été renforcées, notamment avec l'arrêté du 4 mai 2017 (NOR : AGRG1632554A ; reprenant et remplaçant l'arrêté du 12 septembre 2006 ; NOR : AGRG0601345A) interdisant l'utilisation de tels produits (incluant les produits herbicides) à moins de 5 mètres des cours d'eau. Ces textes, en constante évolution, bouleversent les pratiques habituelles et les gestionnaires se trouvent donc confrontés à une problématique de contrôle des ligneux se développant sur les digues et barrages. Des plans de gestion doivent être élaborés afin de concilier les enjeux sécuritaires, environnementaux et paysagers. Mais les méthodes mécaniques traditionnelles (abattage, recepage, dessouchage) sont destructrices pour les ouvrages et le paysage. Il est donc urgent de mettre au point des techniques de gestion préventives appliquées aux jeunes ligneux à risque.

Cette thèse porte sur la recherche de méthodes alternatives de gestion des jeunes ligneux générant des risques sur les ouvrages hydrauliques. Une première partie de cette étude, divisée en trois Phases, a consisté en un criblage et une optimisation en serre et en champ d'un éventail de méthodes adaptées et potentiellement efficaces sur la plupart des espèces les plus rencontrées sur les ouvrages hydrauliques français. Une seconde partie, aussi divisée en trois Phases, a eu pour objectif de mettre en place un criblage de méthodes sélectionnées sur sites en conditions réelles et, à la même occasion, d'optimiser les méthodes selon différents paramètres (la forme des arbres, la sécurité des opérateurs, ...). Cette seconde partie, ciblant seulement des Peupliers noirs, a mis en évidence différentes contraintes et a révélé l'efficacité partielle de certaines méthodes. La dernière Phase en champ a montré l'efficacité de trois traitements sur des Peupliers à 6 mois après traitement (une méthode mécanique, une méthode mécanique couplée à une méthode biochimique et une méthode mécanique couplée à une méthode thermique). Les arbres traités en champ seront observés par l'équipe d'ARBEAUSOLutions en 2018 pour confirmer l'efficacité à 12 mois après traitement. En septembre 2017, deux de ces trois méthodes efficaces ont fait l'objet d'un dépôt de brevet qui permettra de poursuivre les essais in situ sans problème de propriété industrielle. Les résultats de cette recherche suggèrent que l'efficacité d'une méthode de dévitalisation dépend de l'agressivité et de la période d'application du traitement pour éviter que l'arbre ne réponde par la production de rejets et drageons pour garantir sa survie.

Mots clés : Dévitalisation des arbres - digues - canaux - méthodes alternatives - *Populus nigra* - risques induits par les arbres

Title: Identification and tests of devitalization methods on trees which induce risks on dikes and dams**Abstract**

The woody vegetation implanted on dikes and dams is well known for its many positive effects including bank stabilization, biodiversity, shade, etc. Thus, managers have left trees growing on these sites. But, recent studies show that trees and their root systems in particular may cause a range of damage such as uprising, cracking and deconstruction leading to internal risks and external erosion risks for hydraulic structures. A strengthening of the regulations for dikes and dams has obliged managers and owners to ensure the control, the technical monitoring and maintenance of their structures. However, regulations about use of plant protection products have also been reinforced, particularly with the ministerial ruling of 4 may 2017 (NOR : AGRG1632554A) forbidding the use of such products (including chemical herbicides) less than 5 m from bodies of water. These regulations in constant evolution forced a change in the usual practices thereby leaving managers confronted with an important problem of vegetation developing on their dikes and dams. Management plans must be elaborated in order to conciliate security, environmental and landscape issues. But traditional mechanical methods (logging, cutting and root extraction) are destructive for hydraulic structures and landscapes. It is urgent to set up preventive management techniques on young trees which potentially could constitute a risk when they grow.

This thesis focuses on the search of alternative methods of devitalization of young trees generating risks on dikes and dams. The first part of research, divided in three Phases, consisted of screening and optimizing in greenhouse and field a range of possible and effective methods on the most predominant tree species found on hydraulic structures in France. The second part, also divided in three Phases, aimed to put in place a screening of selected methods on field test methods, and, at the same time, optimize methods according to specific parameters (trees shape, security of workers...). This second part, only conducted on black Poplars, has highlighted various constraint and revealed partially effective methods. The last Phase in field, realized only on black Poplars, has shown the effectiveness of three methods (mechanical wounding, mechanical wounding coupled with biochemical, mechanical wounding coupled with thermal) at six months after treatment. The trees treated in the field will be observed by ARBEAUSOLutions staff in 2018 to confirm the efficiency twelve months after treatment. In September 2017, two potential effective methods have been submitted for patent protection in order to enable further tests *in situ* and ensure protection of industrial property rights. The results of this research suggest that the effectiveness of strategies for devitalization depends on the intensity and timing of treatments to avoid that the tree responds by initiating resprouts and suckers for its survival.

Keywords: Tree devitalization - dikes - canals - alternative methods - *Populus nigra* - risks induced by trees

Remerciements

Si l'on m'avait dit qu'après mon Master Pro je poursuivrais mes études en réalisant une thèse ? Moi qui ne m'imaginai pas dans le monde de la recherche, n'avais pas la moindre idée de ce qu'était une CIFRE et qui percevais le doctorat comme trois années interminables...

Et bien finalement, après trois années bien remplies en découvertes, expérimentations, observations, lectures et rencontres, voilà déjà l'heure des remerciements :

Pour cela, je remercie Caroline Zanetti, ma co-directrice de thèse, créatrice et dirigeante de la jeune société ARBEAUSOLutions, à l'origine de ce projet scientifique et qui m'a permis de faire partie de l'Aventure depuis mon stage de M2. Et quelle Aventure que de voir évoluer et grandir une start-up ! Je remercie également Cindy Morris, ma directrice de thèse, sans qui cette Aventure n'aurait pas eu lieu non plus et qui n'a pas hésité à se lancer dans ce projet de thèse CIFRE avec nous. Merci à toutes les deux d'avoir été disponibles pour moi tout au long de ces trois ans, merci pour vos conseils précieux et de m'avoir permis d'arriver jusqu'ici.

Merci aux membres de mon jury qui ont accepté d'évaluer mon travail : Annabel Porté, Ivan Sache, Marc Bardin, Olivier Baudry, Phillipe Nicot et Jacques Tassin.

Je remercie les membres du comité de pilotage de cette thèse : Isabelle Doussan, Thierry Dutoit et Michel Vennetier pour leur soutien scientifique et l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Je remercie également Christelle Lacroix pour avoir accepté de rejoindre ce comité scientifique en cours de route et surtout de m'avoir accordé de son temps afin de m'aider à combler mes lacunes en statistiques et à l'utilisation du logiciel R.

Merci à Marc Bardin et à l'ensemble des personnes constituant l'unité de Recherche en Pathologie Végétale de l'INRA d'Avignon qui malgré mes apparitions furtives m'ont toujours apporté leur soutien et leur aide précieuse. Je remercie plus particulièrement Joël, Nathalie, Michel, Frédéric et Jérémy, la super équipe technique des serres sans qui les expérimentations en milieu contrôlé n'auraient pas été possibles. Merci également à Grégory d'avoir partagé son bureau et sa bonne humeur avec moi.

Je remercie Nelly, ma maman de substitution au travail et mon fidèle binôme de terrain ! Merci pour ces moments passés en ta compagnie (surtout nos pique-niques avec les chèvres).

Je tiens également à remercier les stagiaires et doctorants (et maintenant docteurs) présents durant ces trois années. Votre soutien et le partage de nos expériences m'ont été précieux.

Merci à toutes les autres personnes que j'ai eu la chance de rencontrer lors des colloques et rencontres professionnels qui se sont intéressées de près comme de loin à ce sujet et qui m'ont accordé de leur temps et apporté leur soutien.

Je remercie toute ma famille et tout spécialement mon Père, Martine, mes Frères (Adrien & Jérôme), mes Grand-Parents de Marseille et ma Mamie de Millevaches, pour m'avoir écouté et soutenu tout au long de ces trois années.

Je remercie également tous mes amis, trop nombreux pour pouvoir en faire une liste exhaustive, pour leur joie de vivre, pour m'avoir changé les idées quand ça n'allait pas et pour m'avoir encouragée même s'ils me demandaient tous les 3 mois « quand est-ce que tu finis déjà ? » et « t'en es où du coup dans ta thèse ? »...

Je terminerai ces remerciements par toi, Nico, qui partage mon quotidien depuis plus de 10 ans et sans qui je ne serai probablement pas arrivée jusqu'ici. Tu m'as vu évoluer tout au long de ces années, tu m'as toujours poussée à aller plus loin, à garder confiance en moi et à dépasser mes limites malgré les difficultés.

Sommaire

Résumé.....	3
Abstract	4
Remerciements	5
Sommaire	6
Productions scientifiques et techniques de J. Macia dans le cadre de la thèse	9
INTRODUCTION.....	13
1. Contexte de l'étude	14
2. Convention industrielle de formation par la recherche	17
3. Objectif de l'étude	18
PARTIE I - CONTEXTE ET ETAT DE L'ART.....	21
1. Les ouvrages hydrauliques en France	22
1.1. Les différents types d'ouvrages hydrauliques.....	22
1.2. Les canaux sur le territoire français : inventaire et sécurité	23
1.3. Détériorations et défaillances des canaux	27
1.4. La végétation sur les ouvrages hydrauliques	28
1.4.1. Risques induits	28
1.4.2. Un cadre réglementaire complexe.....	30
1.4.3. ...Et des méthodes de gestion limitées	31
2. La végétation ligneuse	34
2.1. Définitions générales	35
2.2. Etudes autour de l'arbre	36
2.2.1. Structure externe.....	36
2.2.2. Structure interne	39
2.2.3. Etat de santé	40
2.2.4. Stades phénologiques.....	40
2.3. Processus physiologiques et mécaniques des flux de sève.....	41
2.3.1. Potentiel hydrique et flux de sève brute	41
2.3.2. Flux de sève élaborée	45
2.3.3. Variations saisonnières des flux de sève	47
2.4. Cycle de vie des essences ligneuses	49
2.4.1. Reproduction végétative	49
2.4.2. Les essences ligneuses sont-elles immortelles ?	52
3. La dévitalisation des essences ligneuses	54
3.1. Des contraintes à ne pas négliger lors du choix des méthodes	55
3.2. Méthodes chimiques.....	56
3.2.1. Les produits chimiques de synthèse et d'origine naturelle	56
3.2.2. Les modalités d'usage.....	58
3.3. Méthodes non chimiques.....	59
3.3.1. Méthodes mécaniques	59
3.3.2. Méthodes thermiques	62
3.3.3. Méthodes biologiques	64
4. Bilan.....	66

PARTIE II - ESSAIS EN CONDITIONS CONTROLEES.....	69
PARTIE III - MISE EN ŒUVRE DE TRAITEMENTS EN CONDITIONS REELLES.....	125
PARTIE IV - CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	163
1. Synthèse des travaux	164
2. Perspectives	165
2.1. Perspectives scientifiques	165
2.2. Perspectives industrielles.....	166
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	169
ANNEXES	187

Productions scientifiques et techniques de J. Macia dans le cadre de la thèse

Communications à des colloques :

- **Macia J.**, (2016). Des arbres dans le paysage des ouvrages hydrauliques ? Quels risques et quelles solutions. Colloque International Arbres et Paysages organisé par l'INSA, Blois, 16 et 17 mars 2016. **(Présentation Orale)**
- Zanetti C., **Macia J.**, Liency N., Vennetier M., Mériaux P., and Provansal M., (2016). Roles of the riparian vegetation: the antagonism between flooding risk and the protection of environments. In: Books of abstracts FLOODrisk 2016, p. 262. FLOODrisk: 3rd European Conference on Flood Risk Management, Lyon, 18, 19 et 20 October 2016. **(Poster)**
- **Macia J.**, (2016). Identification of devitalization methods on trees which induce risks on dikes and dams: Background. In : 8^{èmes} journées des doctorants SPE, p. 24. Colloque Santé des Plantes et Environnement organisé par le département SPE, Toulouse, 29 et 30 juin et 1^{er} juillet 2016. **(Présentation Orale)**
- **Macia J.**, Liency N., Zanetti C., (2016). Identification of devitalization methods on trees which induce risks on dikes and dams. In: YNHM: Young Natural History scientist' Meeting 2017, p. 155. 4th Young Natural History scientist' Meeting, Paris, 7, 8, 9, 10 et 11 février 2016. **(Poster)**

Manuscrits et publications scientifiques écrites :

- **Macia J.**, Liency N., Zanetti C., Dutoit T., Vennetier M., Doussan I., Morris C., (Manuscrit déposé en voie d'évaluation le 14/11/2017). Concilier enjeux sécuritaires et enjeux environnementaux dans la gestion des ouvrages hydrauliques : une mission complexe. Sciences Eaux et Territoires. 8 p. (Auteur de correspondance)
- **Macia J.**, Liency N., Zanetti C., (2016). Contrôle des arbres sur ouvrages hydrauliques : Quelles solutions dans le contexte actuel ? Environnement & Technique, n°357, p. 64-66. (Auteur de correspondance)
(Article également publié en février 2016 sur le site internet Actu Environnement, www.actuenvironnement.com)

Brevets :

- Zanetti C., Liency N., **Macia J.**, Morris C., Pascal F., (déposé le 12 septembre 2017). Brevet d'Invention : Procédé de dévitalisation des végétaux, V/Réf : B170256FRA. (Inventeur)

Les productions techniques sont gardées confidentielles par souhait d'ARBEAUSOLutions, financeur de ce travail de doctorat réalisé dans le cadre d'une CIFRE.

INTRODUCTION

1. Contexte de l'étude

C'est durant la première moitié du 20^{ème} siècle, marquée par les nombreux ravages sur les cultures et le développement de la chimie organique de synthèse que les pesticides font leur apparition (Casida and Quistad, 1998; Bourguet and Guillemaud, 2016). Auparavant, une pharmacopée principalement composée de substances minérales permettait de protéger les cultures (Bernard, 2017). Mais avec l'intensification des pratiques agricoles à l'après-guerre, les quantités de produits n'ont plus été suffisantes et l'utilisation des techniques manuelles ainsi que des produits naturels ont été délaissés face au besoin accru des rendements et aux nombreux bioagresseurs (agents phytopathogènes, ravageurs, mauvaises herbes, etc.). L'utilisation des pesticides s'est alors généralisée aussi bien en agriculture que pour maîtriser la végétation sur des surfaces non agricoles (jardins, parcs, infrastructures linéaires, etc.) où les enjeux ne sont plus vraiment sanitaires mais surtout paysagers. Le principal objectif devient alors l'éradication des herbacées implantées ponctuellement le long des voiries et autres espaces verts. Ainsi, les herbicides et autres produits dévitalisant ont été privilégiés aux méthodes plus rudimentaires pour leurs nombreux avantages (faible coût, facilité d'application, rapidité et efficacité).

Cependant, dès la seconde moitié du 20^{ème} siècle, des études ont commencé à dénoncer les impacts négatifs des produits chimiques sur l'environnement et se poursuivent encore aujourd'hui (Van Der Werf, 1997; Dubois and Plancke, 2010; Bernard, 2017). En effet, de nombreux pesticides dont les substances actives n'avaient pas été étudiés sur le long terme, par manque de recul, produisent des métabolites et des résidus plus ou moins dégradables pouvant également interagir entre eux (Fenner et al., 2013). Ces substances, nocives à certaines concentrations parfois même infimes, se retrouvent dans les sols, les milieux aquatiques et touchent alors des êtres vivants pourtant non ciblés (Schiavon et al., 1995). Certains produits naturels utilisés dans le temps comme pesticides avaient déjà démontré ces risques comme la bouillie bordelaise, composée de sulfate de cuivre et de chaux, utilisée en tant que fongicide sur les productions agricoles. Le cuivre, qui ne se dégrade pas, s'accumule lorsque la préparation est appliquée en usages répétés et peut alors devenir nocif pour l'environnement.

De plus, avec l'usage intensif des pesticides, les organismes ciblés ont commencé à développer des résistances aux pesticides (Georghiou and Mellon, 1983). Malgré les nombreuses répercussions sur l'environnement et principalement pour des raisons économiques, l'industrie des pesticides ne cesse de progresser. Il est alors devenu impératif de réglementer l'usage de l'ensemble de ces produits.

L'encadrement réglementaire des produits chimiques, dont les pesticides, est propre à chaque pays ce qui rend la tâche complexe lorsqu'il s'agit de contrôler leurs productions, leurs ventes et leurs usages à échelle mondiale. Comme les autres Etats membres, la France se doit d'appliquer les règlements et de transposer les directives publiées par l'Union Européenne.

La réglementation française s'est également fortement renforcée, depuis les années 80 avec les objectifs de restauration de la qualité des eaux de surface puis notamment avec l'interdiction d'utilisation des produits phytopharmaceutiques près des cours d'eau. Cette interdiction touche aussi bien les zones agricoles que les zones non agricoles (parcs, jardins, infrastructures linéaires...). Ces mesures sont encouragées par le plan ECOPHYTO, lancé en 2008 suite au Grenelle de l'environnement, dont le principal objectif est la réduction globale d'utilisation des produits phytopharmaceutiques.

Ne plus utiliser de produits chimiques implique un retour à des pratiques plus laborieuses et surtout plus coûteuses, que bon nombre de gestionnaires avait abandonnées aux profits des méthodes chimiques. C'est notamment le cas des gestionnaires d'ouvrages hydrauliques. En effet, les gestionnaires de digues et barrages sont directement concernés par cette interdiction aux abords des

cours d'eau mise en application dès 2006. Depuis ils assistent impuissants à la végétalisation de leurs ouvrages (Photo 1 et Photo 2).



Photo 1 : Canal hydroélectrique. Les parois (bajoyers) des canaux sont colonisées par des Peupliers noirs qui dégradent le revêtement étanche (Photo : Macia J., 2015).



Photo 2 : Dignes de protection contre les inondations. Les enrochements (à droite) constituant la digue sont recouverts de végétation ligneuse rendant l'inspection visuelle difficile (Photo : Macia J., 2015).

Les paradoxes de la végétation implantée sur les ouvrages hydrauliques

Les arbres et arbustes présents le long des ouvrages ombragent les voies piétonnes et pistes cyclables tout en valorisant le paysage. Cette végétation permet aussi le maintien de la biodiversité faunistique et floristique présente aux abords des ouvrages créant ainsi des corridors écologiques importants pour de nombreuses espèces tout en empêchant la colonisation des sites par d'autres végétaux comme des espèces invasives par l'ombre qu'ils produisent ou en changeant la nature du sol. Par ailleurs, les parties aériennes des arbres permettent d'atténuer le vent et parfois même les nuisances sonores humaines tandis que les systèmes racinaires permettent de stabiliser les talus en terre. En effet, de nombreuses études ont montré que dans le cas des terrains en pente et des berges de cours d'eau, la présence de végétation ligneuse permet de maintenir et de renforcer la stabilité des sols (Simon and Collison, 2002; Curran and Hession, 2013; Lagasse et al., 2016). Geyer et al (2000) et Allen et al (2003) ont également montré que la présence de végétation sur les berges peut réduire jusqu'à 50 % les dégâts occasionnés lors d'épisodes de crues. Les berges où la végétation ligneuse était implantée ont subi moins d'érosion en comparaison des berges en étant dépourvues (Geyer et al., 2000; Allen et al., 2003). Ainsi en période de crue la végétation ligneuse dense peut freiner, amortir et réduire la vitesse du courant de l'eau mais lorsqu'il s'agit d'arbres isolés un effet inverse sera observable. La vitesse de l'eau va augmenter autour du tronc et générer un phénomène d'affouillement local creusant le talus. A cela s'ajoute, le poids des arbres sur les ouvrages et l'action du vent sur les houppiers qui vont venir aggraver les risques d'instabilité des ouvrages et impacter leur intégrité (formation de chablis, décompactage des matériaux constituant les digues ou barrages, etc.) (Douglas Shields, 2016; Savatier et al., 2016).

Le maintien de cette végétation peut alors devenir problématique si un contrôle raisonné de celle-ci n'est pas opéré de manière régulière. En effet, les parties aériennes de la végétation ligneuse peuvent gêner les inspections visuelles. Ces inspections sont pourtant primordiales car elles permettent de mettre en évidence les divers désordres le long des ouvrages comme la présence de zones d'infiltrations, d'effondrements, de fissurations, de soulèvements, de terriers, etc. Un milieu fermé rend alors la tâche difficile voire impossible par endroits. Par ailleurs, si les débris végétaux ou les

troncs d'arbres tombés côté eau ne sont pas rapidement évacués, il peut y avoir formation d'embâcles pouvant entraîner des surverses (Douglas Shields, 2016). La présence d'un couvert boisé entraîne aussi la présence d'animaux fouisseurs pouvant aggraver les risques de détérioration des ouvrages. Les terriers et galeries altèrent les caractéristiques hydrauliques, augmentent les risques d'infiltration et d'érosion interne et impactent parfois même l'intégrité des digues lors d'effondrements des galeries (Dan Marks, 2005; Mériaux and Royet, 2007; Bayoumi and Meguid, 2011).

En ce qui concerne les parties racinaires, des études ont montré que les infiltrations le long des racines vivantes ou en décomposition restent minimales (Tracy and Corcoran, 2012, 2014). Mais une fois décomposées, les racines laissent place à des cavités permettant à l'eau de s'infiltrer et de générer des mouvements emportant les matériaux. Le vide laissé après un déplacement des particules, forme ce que l'on appelle des renards hydrauliques (Mériaux et al., 2015).

Lorsque les systèmes racinaires se développent considérablement sous les ouvrages dont les parois sont bitumineuses ou constituées de plaques de béton ou d'enrochements, les matériaux peuvent se fissurer, se soulever et parfois même basculer sous la force des racines ou lors du renversement de l'arbre (Zanetti et al., 2008, 2013; Zanetti, 2010).

Il reste encore difficile d'évaluer quantitativement la part de l'impact des dégâts causés par la végétation ligneuse sur les ouvrages hydrauliques. D'autant plus que l'observation de la présence de racines et les dégâts occasionnés par la végétation sur les ouvrages sont principalement étudiés lors d'épisodes de crues lorsque les détériorations et défaillances ont déjà eu lieu (Douglas Shields, 2016).

Même si la réglementation reste succincte concernant le contrôle de la végétation implantée sur ouvrages hydrauliques, les gestionnaires ont parfois tendance à vouloir totalement supprimer la végétation aux abords de leurs infrastructures. Afin de prévenir au mieux les défaillances des ouvrages et ne pas augmenter les risques d'érosion, l'élaboration d'un plan de gestion de la végétation reste primordiale. Celui-ci permettra entre autres d'identifier les zones prioritaires et de répartir au mieux le coût des travaux (Mériaux et al., 2015) tout en intégrant les aspects environnementaux. Mais compte-tenu des contraintes réglementaires et des contraintes liées aux sites, les solutions techniques restent limitées et elles ne sont pas toujours adaptées aux problématiques rencontrées.

Des solutions techniques peu satisfaisantes

La première solution envisagée par les gestionnaires est l'abattage des arbres. Cette méthode est la plus utilisée car elle ne nécessite pas de faire de travaux de réparation et n'entraîne pas de coût trop élevé. Toutefois la simple coupe d'un arbre n'entraîne pas toujours l'arrêt de sa croissance et sa mort. Certaines espèces sont connues pour se reproduire de manière végétative et une coupe va, au final, renforcer leur système racinaire. De nouveaux rejets issus de la souche et des drageons issus des racines risquent de faire leur apparition de manière plus ou moins fulgurante. Et dans le cas où l'arbre ne survit pas, la décomposition du système racinaire encore présent peut être à l'origine de dégâts encore plus importants pouvant être très lourds de conséquence pour la sûreté des ouvrages hydrauliques (Zanetti et al., 2013).

Le broyage des souches aboutit à des résultats identiques à l'abattage voire plus néfastes. En effet, la souche devenue non-visible après son broyage est bien souvent oubliée lors des inspections visuelles, alors que les racines latérales intactes poursuivent leur développement dans l'ouvrage (apparition de drageons) ou bien se décomposent.

Le dessouchage reste la solution la plus efficace : la partie aérienne est d'abord coupée avant de procéder à l'extraction de l'ensemble du système racinaire. Mais encore une fois il est très important que toutes les racines soient enlevées car l'oubli d'une partie du système racinaire peut entraîner la croissance de nouvelles pousses (drageons) ou générer des risques d'érosion interne après

décomposition. Dans le cas d'ouvrages constitués de revêtements rigides, cette méthode curative est très invasive car elle oblige la réalisation de travaux de destruction puis de réparation importants pour maintenir l'étanchéité des ouvrages. Compte-tenu de cette méthode laborieuse et selon les zones de réparation, les coûts peuvent aller de 5 à 10 k€ par arbre extrait. De plus, ces méthodes ont un impact fortement négatif sur l'environnement. Les engins nécessaires aux travaux sont à l'origine de pollutions sonores, de pollutions de l'air et le risque lié aux fuites d'hydrocarbures reste également élevé notamment à proximité des milieux aquatiques (Photo 3 et Photo 4). Leurs passages sur les ouvrages ajoutent également un poids non négligeable pouvant accentuer les dégradations ou en occasionner de nouvelles (affaissement, fissurations, etc.). Par ailleurs, l'éventuelle présence d'amiante dans les revêtements est problématique pour l'environnement ainsi que pour la santé des hommes de chantier.

In fine, les zones de réparation représentent par la suite des zones sensibles (joints) où la végétation se développera plus facilement par rapport à des linéaires homogènes dépourvus de zones de réparations (Mériaux et al., 2015).



Photo 3 : Utilisation d'un brise-roche hydraulique lors de travaux de dessouchage sur un canal hydroélectrique (pollution de l'air par poussière et particules fines – gaz d'échappement et risque de pollution hydrocarbures) (Photo : Macia J., 2015).



Photo 4 : Passage d'engins lourds et polluants sur la piste d'un canal lors de travaux de dessouchage. Création de nouveaux joints sur les zones réparées (Photo : Macia J., 2015).

Il devient alors urgent d'identifier de nouvelles solutions qui répondront aux besoins de plus en plus pressants des gestionnaires d'ouvrages hydrauliques en déployant des techniques ayant un impact environnemental bien plus réduit et maîtrisé qui soit en Phase avec la préservation de notre patrimoine naturel et anthropique, dans un souci de développement durable.

2. Convention industrielle de formation par la recherche

Suite aux renforcements règlementaires récents, sur les plans sécuritaires et environnementaux, les modalités d'entretien de la végétation implantée sur les ouvrages hydrauliques se sont complexifiées. C'est en janvier 2013, à l'issue d'une thèse portant sur l'enracinement des arbres dans les ouvrages hydrauliques, que Caroline Zanetti a créé l'entreprise innovante ARBEAUSOLutions. La société propose ainsi différentes missions afin de répondre aux différentes problématiques que connaissent les digues et barrages boisés :

- Inventaire des linéaires boisées générant des risques aux abords des ouvrages hydrauliques
- Diagnostic des ouvrages hydrauliques boisés et préconisations de gestion
- Suivi des chantiers de dessouchages et de reconstruction des ouvrages
- Suivi environnemental des chantiers d'entretien en milieu rivulaire

Sortie de sa période d'incubation en mars 2014 et composée de deux permanents, cette start-up a été hébergée au sein de la pépinière d'entreprises innovantes de Meyreuil (13) jusqu'à la fin de l'été 2017 et son activité se poursuit à présent dans ses bureaux à Belcodène (13).

Avec l'objectif de répondre aux attentes des gestionnaires d'ouvrages, ARBEAUSOLutions a lancé un programme de R&D pour développer des solutions alternatives actuellement inexistantes sur le marché. En effet, l'usage des produits chimiques est interdit à moins de 5 mètres des cours d'eau depuis 2006 et aucune autre méthode efficace et adaptée au contexte des ouvrages hydrauliques n'existe. Les gestionnaires d'ouvrages sont, depuis une dizaine d'années, démunis face à la végétation ligneuse qui ne cesse de se développer sur leurs ouvrages.

Une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE) a été accordée par l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) afin que la société puisse entreprendre des recherches sur ce sujet au travers d'une thèse CIFRE. Une subvention annuelle de 14 k€, soit 50 % du salaire chargé du doctorant, est délivrée à la société par le ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche à laquelle s'ajoute le Crédit d'Impôt Recherche (CIR). Afin de mener à bien cette étude et selon les dispositions de la CIFRE, ARBEAUSOLutions a établi un contrat de collaboration de recherche avec l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). L'encadrement académique et scientifique a été assuré par Cindy Morris au sein de l'Unité de Recherche Pathologie Végétale (UR407) à Montfavet (84).

La mission de recherche stratégique et les travaux réalisés au cours de ces trois années font l'objet de cette thèse. Compte tenu du caractère industriel de cette étude et des perspectives économiques, ces travaux de recherche ont été gardés confidentiels, la finalité de cette étude étant d'aboutir au dépôt d'un brevet.

3. Objectif de l'étude

La gestion de la végétation sur les ouvrages hydrauliques maçonnés constitue le contexte particulier de cette étude, où les gestionnaires sont en demande de nouvelles solutions de contrôle des arbres s'y développant. L'objectif de cette thèse est d'identifier de nouvelles solutions de dévitalisation des jeunes ligneux implantés dans les ouvrages hydrauliques maçonnés. Dévitaliser un arbre revient à provoquer sa mort par le biais d'une ou plusieurs actions sans lesquelles la mort ne serait pas survenue naturellement. Un arbre est considéré comme étant mort lorsque sa partie aérienne ainsi que sa partie souterraine ne sont plus vivantes.

Il s'agit de développer une ou plusieurs techniques alternatives aux produits chimiques, efficaces mais proscrits depuis une dizaine d'année.

La mise au point de telles méthodes alternatives nécessite (i) une connaissance de ces sites et plus particulièrement des contraintes qu'ils impliquent, ainsi qu'une compréhension de la physiologie des ligneux de manière à identifier les techniques qui pourraient dévitaliser les arbres présents sur ces sites tout en respectant l'environnement et la réglementation en vigueur. Un criblage en serre (ii) permettra ensuite de sélectionner les techniques les plus efficaces pour (iii) valider et confronter *in fine* les méthodes de dévitalisation à la réalité du terrain.

Les connaissances actuelles sur les ouvrages hydrauliques, la végétation ligneuse qui y est implantée ainsi que l'identification de méthodes de dévitalisation seront présentées dans la Partie I du manuscrit. Les limites posées par la réglementation seront également abordées dans cette partie.

La partie II présentera les différentes étapes de criblage des méthodes de dévitalisation précédemment identifiées. Elle comportera notamment les protocoles mis en place en conditions contrôlées (*ex situ*) ainsi que les effets observés quelques mois après traitements.

Les essais réalisés sur le terrain (*in situ*) et les effets observés feront l'objet de la Partie III.

La Partie IV de ce manuscrit constituera la conclusion générale de cette étude en exposant une synthèse de l'ensemble des expérimentations menées ; les perspectives scientifiques et industrielles ouvertes par ce travail de recherche y seront également exposées.

PARTIE I - CONTEXTE ET ETAT DE L'ART

1. Les ouvrages hydrauliques en France

Ce premier paragraphe présente les différents types d'ouvrages hydrauliques construits sur le territoire français et le vocabulaire associé. Il a aussi pour objectif de clarifier le contexte particulier de cette thèse. S'agissant principalement de sites industriels, les informations utilisées pour cette partie proviennent principalement des textes réglementaires français et des rapports non scientifiques disponibles en libre accès et élaborés par les différents services du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie mais également établis par les gestionnaires eux-mêmes.

1.1. Les différents types d'ouvrages hydrauliques

Les ouvrages hydrauliques sont des structures de génie civil dont la fonction principale est de gérer l'écoulement des eaux. Le Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie divise ces structures en 3 familles (Service des Risques Naturels et Hydrauliques and Service Technique de l'Énergie Electrique, des Grands Barrages et de l'Hydraulique, 2014) et les définit de la manière suivante :

- Les barrages : il s'agit d'ouvrages construits en travers d'un cours d'eau de manière à faire obstacle et ainsi retenir l'eau. En plus de stocker l'eau, ils sont aussi utilisés pour la production d'hydroélectricité ou la création de bases de loisirs. Les barrages supportent une charge hydraulique permanente.
- Les digues de protection contre les inondations : ces ouvrages linéaires sont construits en parallèle des cours d'eau de manière à contenir les eaux en temps de crue (Figure I. 1). Ces digues sont principalement à charge hydraulique temporaire. Cette famille comprend également les digues de protection contre les submersions en bord de mer qui protègent les littoraux lors des tempêtes.
- Les canaux : ce sont des ouvrages à charge hydraulique permanente qui, comme leur nom l'indique, ont pour objectif de canaliser l'eau (Figure I. 1). Ils comprennent notamment les voies navigables mais englobent également les canaux qui assurent l'irrigation et l'alimentation en eau potable ainsi que la production d'hydroélectricité. Les parois latérales des canaux, nommées digues de canaux, sont réglementairement assimilées à des barrages d'après le décret n°2015-526 du 12 mai 2015 (NOR : DEVP1423128D).

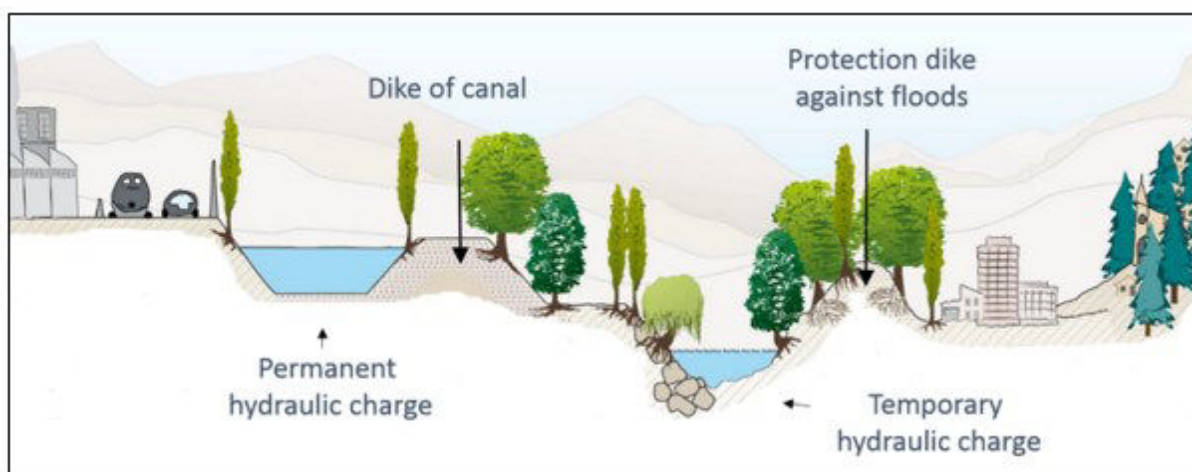


Figure I. 1 : Schéma présentant une digue de canal et une digue de protection contre les inondations (d'après le site www.arbeausolutions.fr, consulté le 22/06/2017).

En plus de leurs différentes fonctions, les ouvrages hydrauliques se différencient par leurs tailles, les matériaux les constituant et leurs morphologies. Par exemple, les parois de canaux hydroélectriques peuvent être constituées de parois rigides bétonnées ou bien bitumineuses (Photo I. 1 et Photo I. 2). Les digues sont de largeurs très variables, allant de moins de 2 m à plusieurs dizaines de mètres à leur base (les remblais des canaux peuvent atteindre plus de 50 m d'emprise au sol).

Cette étude sera consacrée à la problématique des digues de canaux où les gestionnaires rencontrent de nombreux problèmes en lien avec la gestion de la végétation.



Photo I. 1 : Canal dont le bajoyer est constitué d'un revêtement rigide bitumineux (Photo : Macia J., 2015).



Photo I. 2 : Canal dont le bajoyer est constitué d'un revêtement rigide bétonné, les plaques de bétons sont séparées par des joints et comportent des barbicanes (Photo : Macia J., 2015).

1.2. Les canaux sur le territoire français : inventaire et sécurité

Comme définis plus haut, les canaux sont des ouvrages à charge hydraulique permanente, ils assurent le bon acheminement de l'eau pour l'irrigation et la distribution. Les canaux peuvent également servir à la production d'hydroélectricité ou au transport fluvial. Ce sont des ouvrages entièrement ou partiellement artificiels pouvant comprendre des sections en remblai (au-dessus du terrain naturel), en déblai (creusé dans le terrain naturel) et des sections à flanc de coteau partiellement creusées (www.wikhydro.fr, consulté le 11/07/2017 ; Figure I. 2). Les parois constituant les canaux, nommées digues de canaux ou parfois bajoyers, représentent de forts enjeux sécuritaires et nécessitent une attention particulière tout comme les digues de protection contre les inondations.

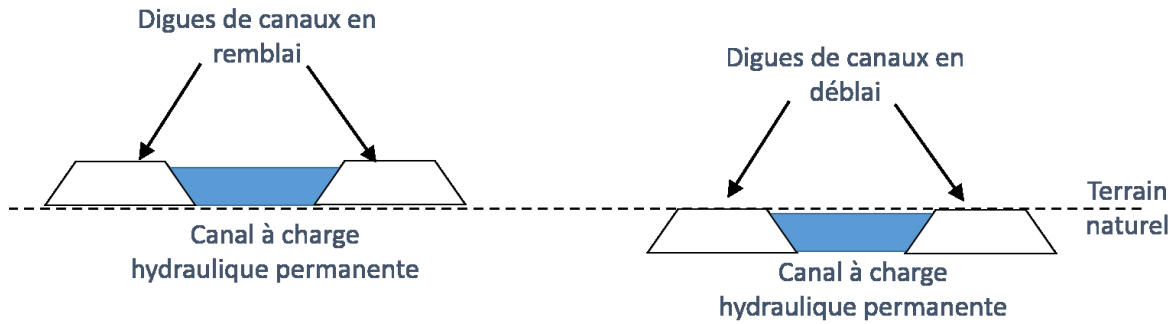


Figure I. 2 : Schéma présentant des digues de canaux en remblai et en déblai (d'après (Vennetier *et al.*, 2004).

Dans un rapport paru en 2008 sur la sûreté des ouvrages hydrauliques en France, le député Christian Kert a précisé qu'il n'existait aucun recensement complet du parc français (Kert, 2008). Pourtant, le projet « SIRS Digues » engagé depuis 1999 avait pour objectif le recensement national des ouvrages mais seuls les barrages de plus de 10 mètres de haut sont bien connus. Le nombre d'ouvrages de tailles inférieures, telles que les digues et les petits canaux, est estimé à plusieurs milliers à la parution de ce même rapport. Dans un but de clarification, le décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 (NOR : DEVO0751165D) proposait un système de classification permettant de simplifier le recensement du parc hydraulique français et de mieux définir les obligations auprès des gestionnaires d'ouvrages. Les barrages y sont alors répartis en 4 classes selon leurs caractéristiques géométriques (Tableau I. 1) ainsi que les digues qui sont elles aussi réparties en 4 classes selon le nombre de personnes présentes en zones protégées et la hauteur (Tableau I. 2).

Tableau I. 1 : Classes des barrages de retenue et des ouvrages assimilés, notamment les digues de canaux (Décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 – NOR DEVO0751165D) ; "H" : hauteur de l'ouvrage exprimée en mètres et définie comme la plus grande hauteur mesurée verticalement entre le sommet de l'ouvrage et le terrain naturel à l'aplomb de ce sommet ; "V" : volume retenu exprimé en millions de mètres cubes et défini comme le volume qui est retenu par le barrage à la cote de retenue normale. Dans le cas des digues de canaux, le volume considéré est celui du bief entre deux écluses ou deux ouvrages vannés.

CLASSE	CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DE L'OUVRAGE
A	$H \geq 20$
B	Ouvrage non classé en A et pour lequel $H^2 \times \sqrt{V} \geq 200$ et $H \geq 10$
C	Ouvrage non classé en A et pour lequel $H^2 \times \sqrt{V} \geq 20$ et $H \geq 5$
D	Ouvrage non classé en A, B ou C et pour lequel $H \geq 2$

Tableau I. 2 : Classes des digues de protection contre les inondations et submersions et des digues de rivières canalisées (Décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 – NOR DEVO0751165D) ; "H" : la hauteur de l'ouvrage exprimée en mètres et définie comme la plus grande hauteur mesurée verticalement entre le sommet de l'ouvrage et le terrain naturel du côté de la zone protégée à l'aplomb de ce sommet ; "P" : la population maximale exprimée en nombre d'habitants résidant dans la zone protégée, en incluant notamment les populations saisonnières.

CLASSE	CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE Et populations protégées
A	Ouvrage pour lequel $H \geq 1$ et $P \geq 50\,000$
B	Ouvrage non classé en A et pour lequel $H \geq 1$ et $1\,000 \leq P \leq 50\,000$
C	Ouvrage non classé en A et pour lequel $H \geq 1$ et $10 \leq P < 1\,000$
D	Ouvrage pour lequel soit $H < 1$, soit $P < 10$

En 2015, un nouveau décret vient modifier le décret de 2007 : Décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques (NOR: DEVP1423128D). Les barrages sont à présent répartis en 3 classes au lieu de 4 tout comme pour les digues (Tableau I. 3 et Tableau I. 4). Il n'est plus seulement question des caractéristiques géométriques des ouvrages mais également de la population protégée par les petits barrages. La nature et la périodicité des obligations imposées aux gestionnaires, comme les études de danger, les rapports d'osculation et les rapports de surveillance, déjà abordés dans le décret de 2007, sont également modifiées. Ces différents rapports et études doivent être fournis à différentes fréquences selon le type et la classe de l'ouvrage (Tableau I. 5). La Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) est aujourd'hui en charge du contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques à l'échelle régionale.

Tableau I. 3 : Classes des barrages de retenue et des ouvrages assimilés (Décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 - NOR: DEVP1423128D) ; "H" : hauteur de l'ouvrage exprimée en mètres et définie comme la plus grande hauteur mesurée verticalement entre le sommet de l'ouvrage et le terrain naturel à l'aplomb de ce sommet ; "V" : volume retenu exprimé en millions de mètres cubes et défini comme le volume qui est retenu par le barrage à la cote de retenue normale. Dans le cas des digues de canaux, le volume considéré est celui du bief entre deux écluses ou deux ouvrages vannés.

CLASSE	CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DE L'OUVRAGE
A	$H \geq 20$ et $H^2 \times V^{0.5} \geq 1\,500$
B	Ouvrage non classé en A et pour lequel $H \geq 10$ et $H^2 \times V^{0.5} \geq 200$
C	Ouvrage non classé en A ou B et pour lequel $H \geq 5$ et $H^2 \times V^{0.5} \geq 20$ Ouvrage pour lequel les conditions prévues au a) ne sont pas satisfaites mais qui répond aux conditions cumulatives ci-après : $H > 2$ $V > 0.05$ Il existe une ou plusieurs habitations à l'aval du barrage, jusqu'à une distance par rapport à celui-ci de 400 mètres

Tableau I. 4 : Classes des systèmes d'endiguement ou des aménagements hydrauliques (Décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 - NOR: DEVP1423128D) ; la population protégée correspond à la population maximale exprimée en nombre d'habitants qui résident et travaillent dans la zone protégée, en incluant notamment les populations saisonnières.

CLASSE	POPULATION PROTEGEE Par le système d'endiguement ou par l'aménagement hydraulique
A	Population < 30 000 personnes
B	3 000 personnes < population ≤ 30 000 personnes
C	30 personnes ≤ population ≤ 3 000 personnes

Tableau I. 5 : Calendrier des études de dangers, rapports de surveillances et rapports d'auscultation que les gestionnaires d'ouvrages doivent fournir en fonction du type d'ouvrage et de la classe (Décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 - NOR: DEVP1423128D).

Ouvrage	Barrage			Digue		
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe A	Classe B	Classe C
Etude de dangers	1 tous les 10 ans	1 tous les 15 ans	1 tous les 20 ans	1 tous les 10 ans	1 tous les 15 ans	1 tous les 20 ans
Rapport de surveillance	1 par an	1 tous les 3 ans	1 tous les 5 ans	1 tous les 3 ans	1 tous les 5 ans	1 tous les 6 ans
Rapport d'auscultation	1 tous les 2 ans	1 tous les 5 ans	1 tous les 5 ans	Sans objet		

Des bilans d'activités portant sur le contrôle des ouvrages hydrauliques sont élaborés depuis la mise en évidence du manque de connaissance du parc des ouvrages hydrauliques français. Le dernier en date est paru en avril 2016 et porte sur le bilan d'activité 2014 (Service des Risques Naturels et Hydrauliques and Service Technique de l'Energie Electrique, des Grands Barrages et de l'Hydraulique, 2016). Les chiffres de recensement pour l'année 2014 sur l'ensemble du territoire français (métropole et DOM-TOM) sont les suivants :

- 8 156 barrages dont 872 font l'objet d'une concession hydroélectrique de la part de l'Etat
- 9 086 km de digues de protection et ouvrages assimilés

Même si le recensement des digues et barrages de grandes envergures (classe A) est aujourd'hui achevé, le recensement complet des autres ouvrages et plus particulièrement des petites digues nécessite encore du temps. En effet, les ouvrages étant de très petites tailles et de moindres importances, il arrive parfois que leurs découvertes soient accidentelles. De plus, les propriétaires de tels ouvrages ne sont pas toujours identifiés.

1.3. Détériorations et défaillances des canaux

Le vieillissement des ouvrages hydrauliques n'est pas inévitable mais il peut être prématuré à la suite de divers mécanismes de détériorations. Trois familles sont connues : l'érosion interne, l'érosion externe et les instabilités (Sharp *et al.*, 2013) :

- Les mécanismes d'érosion interne sont nombreux et se déroulent à l'intérieur d'un sol, c'est pourquoi ils sont difficilement visibles lors d'inspections visuelles. Ces phénomènes ont lieu à la suite d'un détachement de particules et de leur transport par l'eau.
- Les mécanismes d'érosion externe regroupent des phénomènes qui ont lieu en surface et qui sont donc plus facilement observables. Les mécanismes d'érosion externe résultent d'un déplacement des particules provoqué par un ou plusieurs facteurs externes d'intensités variables tels que l'action de l'eau (ruissèlement, pluies, crues) ou du vent.
- Les instabilités sont principalement des mécanismes de glissements de matériaux le long d'une pente sous l'action des forces de gravité. Elles peuvent avoir lieu sous le poids d'un engin par exemple.

Ces processus de détériorations fréquents agissent souvent en synergie et peuvent entraîner des défaillances de l'ouvrage telles que les brèches ou les surverses. Par exemple, les instabilités et les phénomènes d'érosion externe peuvent causer des modifications de la pente et rabaisser le niveau de crête ce qui entraîne par la suite une surverse. L'inverse est également observable : une surverse, générée lors d'intempéries par exemple, peut générer des phénomènes d'érosion pouvant ensuite créer une brèche.

En France, le dernier événement catastrophique lié aux ouvrages hydrauliques remonte à la rupture du barrage de Malpasset en 1959 (Kert, 2008). Depuis, des défaillances de certains ouvrages hydrauliques ont principalement eu lieu à la suite d'événements climatiques "majeurs" telle que la tempête Xynthia, aux caractéristiques pourtant singulières, qui a provoqué des submersions marines sur les côtes vendéennes et charentaises en 2010 et fait 41 victimes sans compter les nombreux dégâts matériels (Vinet *et al.*, 2011). Plus récemment, des crues et inondations ont touché pas moins de 17 départements français entre le 28 mai et le 4 juin 2016 causant encore une fois de nombreux dégâts humains et matériels. La réglementation française, sous l'influence des textes européens, s'est alors renforcée de manière à limiter les pertes matérielles et humaines. La gestion du risque inondation est

devenue l'une des priorités des textes se référant aux ouvrages hydrauliques. Depuis 2015, l'ensemble des ouvrages (construits ou aménagés) contribuant à la protection directe d'une zone contre les inondations est nommé **système de protection contre les inondations**. Les ouvrages, qui participent indirectement à la protection d'une zone contre les inondations sont qualifiés d'**aménagements hydrauliques** (Décret n°2015-526 du 12 mai 2015 ; NOR : DEVP1423128D).

1.4. La végétation sur les ouvrages hydrauliques

Parmi les phénomènes générant la dégradation des ouvrages, le développement de la végétation est à considérer dans la mesure où cela occasionne un vieillissement prématuré des infrastructures. Les risques induits par la végétation seront présentés dans la suite de ce paragraphe. Les mesures réglementaires se rapportant à ce sujet ainsi que les méthodes de gestions actuelles seront également abordées.

1.4.1. Risques induits

La végétation spontanée implantée sur les ouvrages hydrauliques fait partie d'un écosystème façonné par l'homme et la modification ou le management de cette végétation présente sur l'ouvrage impacte de manière directe ou indirecte les fonctions de l'ouvrage.

Compte tenu des enjeux sécuritaires, des études portant sur les risques occasionnés par la végétation implantée sur les ouvrages hydrauliques ont récemment été entreprises en France (Zanetti, 2010; Vennetier *et al.*, 2014; Bambara, 2016; Mary, 2016).

La végétation, lorsqu'elle est non maîtrisée, peut présenter divers inconvénients plus ou moins graves pour la sécurité des ouvrages. La végétation de types herbacée et arbustive est en effet moins problématique que la végétation arborescente. Tous trois peuvent gêner les inspections visuelles pour l'élaboration des rapports vus précédemment et favorisent la venue d'animaux fouisseurs à l'origine de réseaux de galeries. Ces galeries exposent les ouvrages au risque de rupture par érosion interne (Vennetier *et al.*, 2006). En revanche les arbres, de par leurs dimensions et leurs systèmes racinaires plus imposants, génèrent des risques supplémentaires d'érosion interne et externe (Zanetti, 2010).

Dans le cas des canaux et des digues de canaux, le développement du système racinaire et le basculement des arbres peuvent entraîner des déformations, des fissurations voire même des soulèvements des revêtements (Photo I. 3 et Photo I. 4). Des infiltrations sont également possible le long des racines qui ont une croissance en diamètre pouvant aller jusqu'à 6 mm par année et une croissance en longueur atteignant parfois 70 cm par année selon le type de racines et l'espèce (Zanetti, 2010) (Photo I. 5). Lorsque ces dernières entrent en décomposition, les cavités forment des renards hydrauliques où les infiltrations d'eau peuvent provoquer des brèches et des effondrements (Photo I. 6).

Comme expliqué dans l'introduction, la végétation peut également induire des bénéfices. Les bénéfices et risques induits par la végétation arborescente dépendront cependant des caractéristiques des arbres (structure du système racinaire, parties aériennes, etc.) ainsi que des caractéristiques de l'ouvrage considéré (dimensions, matériaux de construction, fonctions données, charge hydraulique, etc.) (Figure I. 3).



Photo I. 3 : Soulèvement et destruction d'une digue suite au développement du système racinaire et au basculement d'un arbre (Photo : Zanetti C., 2010).



Photo I. 4 : Basculement du bajoyer suite au basculement d'un arbre (Photo : Zanetti C., 2010).



Photo I. 5 : Soulèvement d'une dalle et risque d'infiltrations par les racines (Photo : Zanetti C., 2010).



Photo I. 6 : Formation d'un renard hydraulique suite à la décomposition d'une racine (Photo : Zanetti C., 2010).

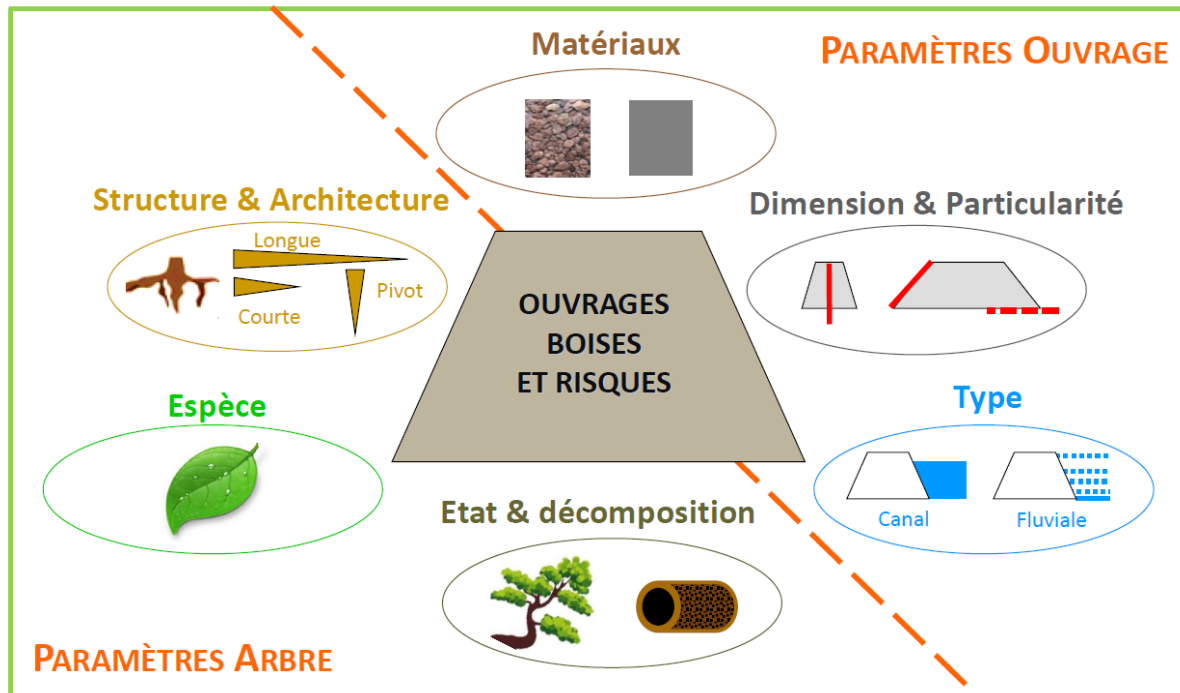


Figure I. 3 : Synthèse des paramètres à prendre en compte pour l'évaluation des risques (Zanetti, 2013)

1.4.2. Un cadre réglementaire complexe...

Il vient d'être exposé que les arbres peuvent générer des risques d'érosion interne et externe à l'origine d'un vieillissement prématuré des ouvrages. Mais qu'en est-il de la réglementation à ce sujet ? Depuis 2015, les gestionnaires, propriétaires, exploitants ou concessionnaires se doivent de justifier « *que les ouvrages sont adaptés à la protection annoncée et qu'il en va de même de leur entretien et de leur surveillance* » (décret n°2015-526 du 12 mai 2015 ; NOR : DEVP1423128D). Par exemple, l'étude de danger pour un système d'endiguement doit contenir « *un diagnostic approfondi de l'état des ouvrages et prendre en compte le comportement des éléments naturels situés entre les tronçons de digues ou à l'extrémité d'une digue ou d'un ouvrage le composant* ». Cependant, l'opération d'entretien des ouvrages n'est pas explicite au sujet de la végétation qui y est implantée. D'ailleurs ces textes ne recommandent pas de proscrire ou d'éradiquer la végétation quelle qu'elle soit.

Plus récemment, le décret n°2016-530 du 27 avril 2016 relatif aux concessions d'énergie hydraulique (NOR : DEVR1523885D) dispose que le concessionnaire d'un ouvrage veille à son bon état de marche et à son entretien, encore une fois sans détailler les principes de ce dernier (périmètre concerné par l'entretien, hauteur de végétation recommandée, etc.). Seul l'annexe de ce décret, proposant un modèle de cahier des charges des concessions d'énergie hydraulique, fournit quelques informations supplémentaires à ce sujet :

- Article 11 de l'annexe : « Le concessionnaire est responsable de la conservation et de l'entretien des emprises situées dans le périmètre géographique de la concession »
- Article 38 de l'annexe : « Le concessionnaire prend toutes les mesures nécessaires pour assurer l'entretien des cours d'eau du domaine public qui lui ont été concédés, selon les dispositions de l'article L. 215-14 du code de l'environnement. Il veille à ce titre au nettoyage et à l'enlèvement des embâcles, débris et atterrissements, flottants ou non, à l'élagage et au recépage de la végétation des rives »

Ces recommandations restent vagues alors que la problématique autour de la végétation présente sur les ouvrages hydrauliques n'avait pas été mentionnée depuis l'arrêté du 29 février 2008 fixant les prescriptions relatives à la sécurité et à la sûreté des ouvrages hydrauliques (NOR: DEVO0804503A) :

- Article 4 : « La description de l'organisation mise en place par le propriétaire ou l'exploitant de l'ouvrage pour assurer l'exploitation et la surveillance de son ouvrage mentionnée au « I » de l'article R. 214-122 du code de l'environnement portent notamment sur :
 - les modalités d'entretien et de vérifications périodiques du corps de l'ouvrage et des divers organes fixes ou mobiles ;
 - le contrôle de la végétation ».

Ainsi, aucune forme de végétation n'est à priori recommandée ni proscrite sur et dans l'environnement des ouvrages hydrauliques : il leur est simplement préconisé d'entretenir leurs ouvrages. C'est pourquoi lors des travaux de rénovation et d'entretien, la végétation est souvent supprimée et peu d'ouvrages sont volontairement végétalisés par des essences ligneuses. Sur le long terme, si les ouvrages ne sont pas régulièrement entretenus après de tels travaux, la végétation naturelle reprend ses droits et entraîne de nouveau leur vieillissement prématuré. Il revient donc aux gestionnaires, propriétaires, exploitants ou concessionnaires d'établir des plans de gestion de la végétation de manière à maintenir un état optimal de sécurité et de sûreté de leurs ouvrages tout en réduisant l'impact sur les fonctions écologiques des milieux (Mériaux *et al.*, 2015).

1.4.3. ...Et des méthodes de gestion limitées

Le développement des produits chimiques durant la seconde moitié du 20^{ème} siècle a fait émerger une gamme de traitements permettant de contrôler la végétation rapidement, efficacement et à moindre coût. Ces solutions ont très vite remplacé la gestion mécanique de la végétation présente aux abords des ouvrages hydrauliques. Il s'agit de produits à usages herbicide, débroussaillant et dévitalisant faisant partie aujourd'hui des produits phytopharmaceutiques au sens de la réglementation européenne et des textes français. Souvent regroupés avec les produits biocides sous l'appellation pesticide, les produits phytopharmaceutiques ont fait l'objet d'une première directive en 1978 concernant l'interdiction de mise sur le marché et d'utilisation des produits phytopharmaceutiques contenant certaines substances actives (Directive 79/117/CEE ; NOR : 31979L0117).

Vers la fin des années 80, des études ont commencé à mettre en avant les effets négatifs des produits de synthèse sur l'environnement et compte tenu de l'essor des pesticides et des recherches associées, les textes ont évolué. Aujourd'hui, le règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH) est le texte de référence des produits chimiques. Les produits chimiques au niveau européen sont contrôlés par l'agence européenne des produits chimiques (ECHA).

Les produits phytopharmaceutiques sont principalement encadrés par le règlement (CE) n° 1107/2009 du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques. L'article 2 de ce même règlement définit les produits phytopharmaceutiques de la manière suivante :

« Produits sous la forme dans laquelle ils sont livrés à l'utilisateur, composés de substances actives, phytoprotecteurs ou synergistes, ou en contenant, et destinés à l'un des usages suivants :

- Protéger les végétaux ou les produits végétaux contre tous les organismes nuisibles ou prévenir l'action de ceux-ci, sauf si ces produits sont censés être utilisés principalement pour des raisons d'hygiène plutôt que pour la protection des végétaux ou des produits végétaux ;

- Exercer une action sur les processus vitaux des végétaux, telles les substances, autres que les substances nutritives, exerçant une action sur leur croissance ;
- Assurer la conservation des produits végétaux, pour autant que ces substances ou produits ne fassent pas l'objet de dispositions communautaires particulières concernant les agents conservateurs ;
- Détruire les végétaux ou les parties de végétaux indésirables, à l'exception des algues à moins que les produits ne soient appliqués sur le sol ou l'eau pour protéger les végétaux ;
- Freiner ou prévenir une croissance indésirable des végétaux, à l'exception des algues à moins que les produits ne soient appliqués sur le sol ou l'eau pour protéger les végétaux. »

Lorsqu'un produit phytopharmaceutique obtient une Autorisation de Mise sur le Marché (AMM), un usage (au minimum) lui est alors attribué. D'après l'article D253-8 (II) du Code rural et de la pêche maritime, un usage correspond à « l'association d'un végétal, produit végétal ou famille de végétaux avec un ravageur, groupe de ravageurs, maladie ou groupe de maladies contre lequel le produit est dirigé ou avec une fonction ou un mode d'application de ces produits ». Ces usages sont répertoriés dans le catalogue national des usages phytopharmaceutiques dont la dernière version est sortie dans la note de service DGAL/SDQP/2015-253 du 10 mars 2015. On y retrouve entre autres plusieurs usages de dévitalisant ou de destruction de végétaux ligneux dans les parties « usage spécifiques du fascicule Zone Non Agricole (ZNA) » et « traitements généraux » concernant toutes les cultures en zone agricole ou non agricole (Tableau I. 6). D'après la définition donnée plus haut d'un usage, les cultures ou jardins seraient donc associés à un arbre ou une souche, identifié comme le ravageur, et contre lequel le produit dévitalisant serait dirigé. Mais pour le cas des arbres implantés sur les ouvrages hydrauliques, cette définition ne semble pas être valide.

Tableau I. 6 : Exemple d'usages (référence et libellé de l'usage associé) présents dans le catalogue national des usages phytopharmaceutiques ayant pour but de détruire ou dévitaliser les végétaux ligneux (note de service DGAL/SDQP/2015-253 du 10 mars 2015).

Référence	Libellé de l'usage
11015911	Traitements généraux*Dévital. Broussailles
11015910	Traitements généraux*Dévitalisation*Arb. sur pied Souches
11015925	Traitements généraux*Destruct. Souches
00401014	Forêt*Dévitalisation

Dans le cadre du développement durable, et plus particulièrement de la protection des milieux aquatiques, de nombreux textes ont été adoptés afin de limiter l'utilisation des produits phytopharmaceutiques. Parmi eux, l'arrêté du 4 mai 2017 (NOR : AGRG1632554A ; reprenant et remplaçant l'arrêté du 12 septembre 2006 ; NOR : AGRG0601345A), interdit l'application directe de produits phytopharmaceutiques sur les cours d'eau et les éléments du réseau hydrographique figurant sur les cartes IGN au 1/25 000. Le même arrêté rend obligatoire le respect d'une Zone Non Traitée (ZNT). Il s'agit d'une zone où il est interdit d'utiliser un produit phytopharmaceutique par application directe, pulvérisation ou poudrage. La taille minimale de cette zone correspond à une bande de 5 m de large depuis la bordure du cours d'eau et peut s'étendre jusqu'à 100 m selon le produit utilisé. De plus, initié en 2008, le plan national français Ecophyto vise de manière générale à réduire progressivement l'utilisation des produits phytopharmaceutiques. Il incite également à supprimer l'utilisation de ces produits partout où cela est possible dans les parcs et jardins, ainsi que les espaces

végétalisés au niveau des infrastructures (www.ecophyto-pro.fr, consulté le 08/08/2017). Afin de concrétiser ces actions, la loi n°2014-110 du 6 février 2014, aussi nommée Loi Labbé (NOR : DEVX1330135L), interdit l'utilisation des produits phytopharmaceutiques pour l'entretien de certaines zones non agricoles (espaces verts, promenades ou forêts accessibles au public). Un an plus tard, la loi de transition énergétiques pour la croissance verte (NOR : DEVX1413992L) a ajouté les voiries à cette liste de zones non agricoles. Comme l'indique le site internet Ecophyto-pro du Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, l'alternative à ces produits serait l'utilisation de produits composés de « substances actives à faible risque », de « substances de base » ou de « substances issues de produits naturels ». Mais l'utilisation de tels produits reste complexe dans le cadre de la gestion de la végétation sur ouvrages hydrauliques avec la proximité des cours d'eau :

- Les substances actives à faible risque sont celles ne comportant pas de substances classées pour leur toxicité, persistantes, à forte bioconcentration ou à effet perturbateur endocrinien d'après le règlement (CE) n° 1107/2009 du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009. Toutefois, il s'agit d'une classe particulière des produits phytopharmaceutiques pour qui le respect d'une ZNT reste alors obligatoire.
- Les substances de base, également définies dans le règlement (CE) n° 1107/2009 du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009, sont des substances actives non préoccupantes et dont l'utilisation principale n'est pas phytosanitaire. Ces substances peuvent avoir des usages phytopharmaceutiques mais ceux-ci doivent avoir été approuvés par l'Union Européenne, ce qui peut prendre un certain temps et en limiter l'usage. Par exemple, après une demande datant du 24 avril 2013, le vinaigre n'a été autorisé en tant que substance de base qu'en mai 2015, soit deux ans plus tard, mais uniquement pour un usage de traitement fongicide ou bactéricide sur diverses semences maraichères ou la désinfection des outils horticoles. Depuis le 28 septembre 2017, le sel alimentaire (chlorure de sodium) a également été autorisé comme substance de base pour des usages insecticides et fongicides sur les vignes notamment. Sa demande d'autorisation avait été instruite par l'Institut Technique de l'Agriculture Biologique en juin 2016, soit un an plus tôt.
- Les préparations à base de produits naturels ont été très controversées et n'ont finalement pas été reconnues dans les règlements européens. En France, ces produits sont nommés Préparations Naturelles Peu Préoccupantes (PNPP) et sont mentionnés dans le Code Rural et le décret n°2009-792 du 23 juin 2009 relatif à la mise sur le marché des Préparations Naturelles Non Préoccupantes (PNPP) à usages phytopharmaceutiques (NOR : AGRG0904970D). Alors que ce même texte français visait à encourager leurs usages, les PNPP ne sont autorisées que si elles sont uniquement composées de substances de bases ce qui renvoie au Règlement (CE) n° 1107/2009, ou si elles ont un usage particulier de biostimulant d'après un décret plus récent (Décret n° 2016-532 du 27 avril 2016 relatif à la procédure d'autorisation des substances naturelles à usage biostimulant ; NOR : AGRG1610262D). En dépit d'une simplification des démarches et compte tenu des critères requis, de nombreux produits se sont vu refuser leur AMM et l'application d'une zone tampon reste obligatoire. Pour l'instant non reconnus au sens de l'Europe, de nombreux produits naturels sont encore en attente d'approbation alors qu'une réglementation européenne est attendue pour les prochaines années.

Les substances à faible risque et les substances de base sont répertoriées parmi 1367 substances actives dans la base de données de la Commission Européenne. D'après cette base de données, seulement 10 substances à faible risque et 18 substances de base sont actuellement approuvées (ec.europa.eu « UE Pesticides Database » ; consultée le 22/12/2017). En effet, malgré un dispositif allégé pour ces produits, les procédures de demande d'autorisation restent longues et complexes. De plus, le respect d'une zone tampon demeure obligatoire et s'inscrit dans une politique qui tend à

réduire les impacts négatifs sur l'environnement. Par ailleurs, il existe encore de nombreuses incohérences sur la classification des substances, les termes employés ainsi que sur les dispositions réglementaires qui s'y rapportent au niveau Français et Européen (Doussan and Thevenot, 2013). Afin d'y voir plus clair avec tous ces textes, le 16 juin 2016, l'Association Française de Protection des Plantes (AFPP) a décidé de mettre en place une commission « réglementation » ayant pour objectifs de recenser, compiler et analyser les textes réglementaires encadrant les produits phytopharmaceutiques pas toujours évidents à interpréter puis à appliquer (Decoin, 2015, 2017).

Les produits biocides quant à eux sont aujourd'hui encadrés par le Règlement (UE) n°528/2012 du Parlement européen et du Conseil du 22 mai 2012 concernant la mise sur le marché et l'utilisation des produits biocides. Dans ce même règlement, l'article 3 (1. a) définit un produit biocide comme : « *Toute substance ou tout mélange destiné à détruire, repousser ou rendre inoffensifs les organismes nuisibles, à en prévenir l'action ou à les combattre de toute autre manière par une action autre qu'une simple action physique ou mécanique* ».

Ce règlement concernant l'utilisation des biocides ne mentionne pas la mise en place d'une ZNT. De plus, au sens du même règlement un organisme nuisible est « *un organisme, y compris les agents pathogènes, dont la présence n'est pas souhaitée, ou qui produit un effet nocif pour l'homme, ses activités ou les produits qu'il utilise ou produit, pour les animaux ou l'environnement* ». Les arbres générant des risques pourraient être considérés comme des organismes nuisibles pour les infrastructures construites par l'homme. Cependant, tout comme les usages particuliers des produits phytopharmaceutiques, les produits biocides sont classés parmi 22 types de produits (TP) cités à l'annexe V du même règlement. Mises à part les mousses et les algues aucun ne cible les végétaux indésirables. En effet, les produits de lutte contre les végétaux sont considérés comme des produits phytopharmaceutiques.

Face à ces restrictions réglementaires, les gestionnaires d'ouvrages hydrauliques sont revenus vers des méthodes mécaniques telles que l'abattage, le dessouchage ou le broyage des souches, présentées en introduction. Mais ces méthodes mécaniques sont soit peu satisfaisantes car la croissance de nouvelles pousses avec un renforcement des systèmes racinaires est souvent observée, soit très onéreuses et invasives avec un impact négatif sur l'environnement ainsi que sur l'ouvrage (5 à 10 k€ par arbre extrait).

2. La végétation ligneuse

L'interdiction d'usage des produits chimiques à proximité des cours d'eau et l'absence de solutions alternatives ont conduit au développement d'une végétation arborescente abondante sur les ouvrages non entretenus. Lorsque les dégradations occasionnées par les arbres sont déjà visibles, le dessouchage, bien qu'invasif et onéreux, reste inévitable. Pour les jeunes arbres en cours de développement, et qui généreront des risques à moyen terme, un simple abattage ne permet pas de stopper leur croissance comme cela sera présenté par la suite. C'est pourquoi cette étude porte sur de jeunes essences ligneuses plus ou moins isolées poussant spontanément sur les ouvrages hydrauliques et sur l'identification de méthodes permettant leur dévitalisation.

Afin d'orienter au mieux les choix des nouvelles solutions à mettre au point, la connaissance du fonctionnement de ces essences à l'échelle de l'arbre mais aussi des tissus qui le composent reste essentielle. Cependant la taille des végétaux ligneux, leur rythme de développement et la complexité de leur organisation ont rendu leurs études difficiles et ont obligé la communauté scientifique à morceler les thématiques en disciplines spécialisées, et encore de nombreuses questions restent sans réponse à l'heure actuelle.

2.1. Définitions générales

Les essences ligneuses désignent les végétaux produisant une grande quantité de lignine, une macromolécule organique composant le bois qui assure entre-autres la rigidité de la plante. Certaines plantes herbacées produisent de la lignine mais en plus faibles proportions que les essences ligneuses (produisant du bois) et des structures proches de la lignine ont été identifiées chez certaines mousses et algues vertes (Vanholme *et al.*, 2010). Les gymnospermes (conifères, gingkos, cycas etc.) et les angiospermes (plantes à fleurs ou feuillus), deux sous embranchements des plantes vasculaires, regroupent les essences ligneuses « vraies ». Seul le cas des angiospermes, et plus particulièrement le cas des essences feuillues arborescentes, fera l'objet de cette étude. En effet, les feuillus ont la capacité d'émettre des rejets issus de la souche ainsi que des drageons depuis les racines contrairement aux gymnospermes qui n'en sont pas capables mises à part quelques exceptions (Del Tredici, 2001; Drénou, 2016). Mais avant d'aller plus loin il est important de redéfinir ce qu'est un arbre. Il existe en effet de nombreuses définitions de l'arbre selon les disciplines et des critères de hauteurs sont souvent pris en compte (Gschwantner *et al.*, 2009). Une majorité des définitions s'accordent sur trois conditions pour distinguer un arbre d'un arbuste (Tableau I. 7).

Tableau I. 7 : Caractéristiques communes à la plupart des définitions pour distinguer un arbre d'un arbuste à l'âge adulte (Gschwantner *et al.*, 2009).

Arbre	Arbuste
<ul style="list-style-type: none"> - Essence ligneuse pérenne - Houppier plus ou moins défini - Avec un tronc unique ou plusieurs troncs (dans le cas de taillis) 	<ul style="list-style-type: none"> - Essence ligneuse pérenne - Souvent sans houppier bien défini - La hauteur est comprise entre 0,5 et 5 m

Cependant, la différence de hauteur entre un arbre et un arbuste à l'âge adulte demeure encore variable (Bastien and Gauberville, 2011). D'après C. Drénou, il ne faut plus tenir compte de la hauteur mais des critères morphologiques, il propose alors la définition suivante : « *un arbre est un végétal produisant du bois et capable de construire un tronc unique et individualisé* » (Drénou, 2016). Il distingue alors trois formes biologiques naturelles : l'arbre, le buisson et la colonie, au lieu de différencier les arbres des arbustes. Cependant, l'appartenance d'une essence ligneuse à l'une de ces trois formes peut s'avérer complexe car il arrive qu'une essence arborescente devienne un buisson ou une colonie à la suite d'une coupe du tronc principal ou d'autres évènements (Del Tredici, 2001) (voir 2.4.1., Partie I). Cette étude s'appuiera donc en partie sur cette définition morphologique des arbres pour la qualification des essences ligneuses ciblées. Cependant, les termes de franc-pied, multibrins (ou cépée ou rejets) et colonies (ou drageons) basés sur ces mêmes critères morphologiques seront préférentiellement utilisés pour ces essais étant plus adaptés aux contextes (Figure I. 4).

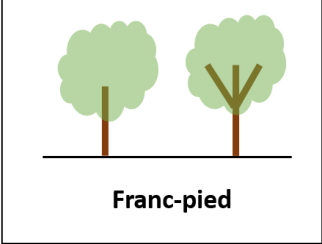
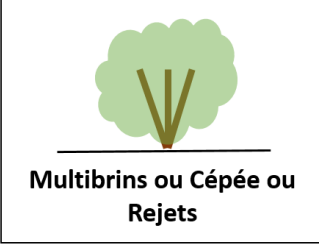

			
Caractères morphologiques	Tronc unique portant un houppier prolongeant le tronc (schéma de gauche) ou réitérant le tronc initial (schéma de droite)	Troncs multiples issus d'un même point au niveau du sol	Troncs multiples et indépendants issus d'une multiplication végétative

Figure I. 4 : Classification des formes biologiques naturelles en fonction des caractères morphologiques observés (Drénou, 2016).

2.2. Etudes autour de l'arbre

Le fonctionnement des essences ligneuses englobe l'ensemble des phénomènes actifs organisés dans le temps, ces phénomènes sont identifiables selon différentes approches fonctionnelles (Dreyfus, 1999). Ces approches vont varier en fonction du niveau d'échelle étudiée, cela peut être au niveau du peuplement forestier, de l'arbre, d'une branche, d'une feuille ou du chloroplaste (Gschwantner *et al.*, 2009). Tous les niveaux d'étude ne peuvent être appréhendés en même temps et l'échelle choisie a un impact sur les types d'expérimentations. Par exemple, à l'échelle de la feuille, un recours à des appareillages et des analyses en laboratoire seront possibles tandis qu'une étude à l'échelle de l'arbre imposera des contraintes de temps et d'espace notamment. Ainsi, l'étude de l'arbre dans sa globalité est préférable *in situ* surtout lorsqu'il s'agit d'arbres adultes compte tenu de leurs dimensions aériennes et souterraines. Par ailleurs, les interactions qu'ils peuvent avoir avec leurs environnements sont très importantes et sont difficilement reproductibles en milieu contrôlé comme les conditions physico-chimiques des sols, les interactions avec les macro-organismes et micro-organismes, l'ensoleillement, la disponibilité en eau, la compétition avec les autres végétaux, etc. (Shigo, 1986). Les observations *in situ* de la structure interne et de tissus observables à l'œil nu peuvent déjà apporter beaucoup d'informations, notamment sur l'état de santé et le stade phénologique des arbres.

2.2.1. Structure externe

A l'échelle de l'arbre, les études peuvent également porter sur différents niveaux (Figure I. 5). Le niveau choisi dépendra alors de l'objet de l'étude (Dreyfus, 1999; Gschwantner *et al.*, 2009). Les parties aériennes et souterraines sont vitales car elles assurent notamment un certain nombre de flux ainsi que différentes fonctions dans la plante présentés succinctement dans la suite de cette partie (voir 2.3 de la partie I). La partie aérienne peut être observée dans son ensemble ou bien être plus ou moins décomposée. Les branches situées au sommet du tronc et leurs feuillages constituent le houppier. Les feuilles assurent la photosynthèse fournissant l'oxygénation et les sucres nécessaires à l'arbre. Les feuilles permettent également l'évapotranspiration via les stomates. Le collet est la zone de transition entre les parties aérienne et souterraine mais sa définition morphologique reste encore imprécise et rares sont les études qui y sont consacrées (Del Tredici, 2001).

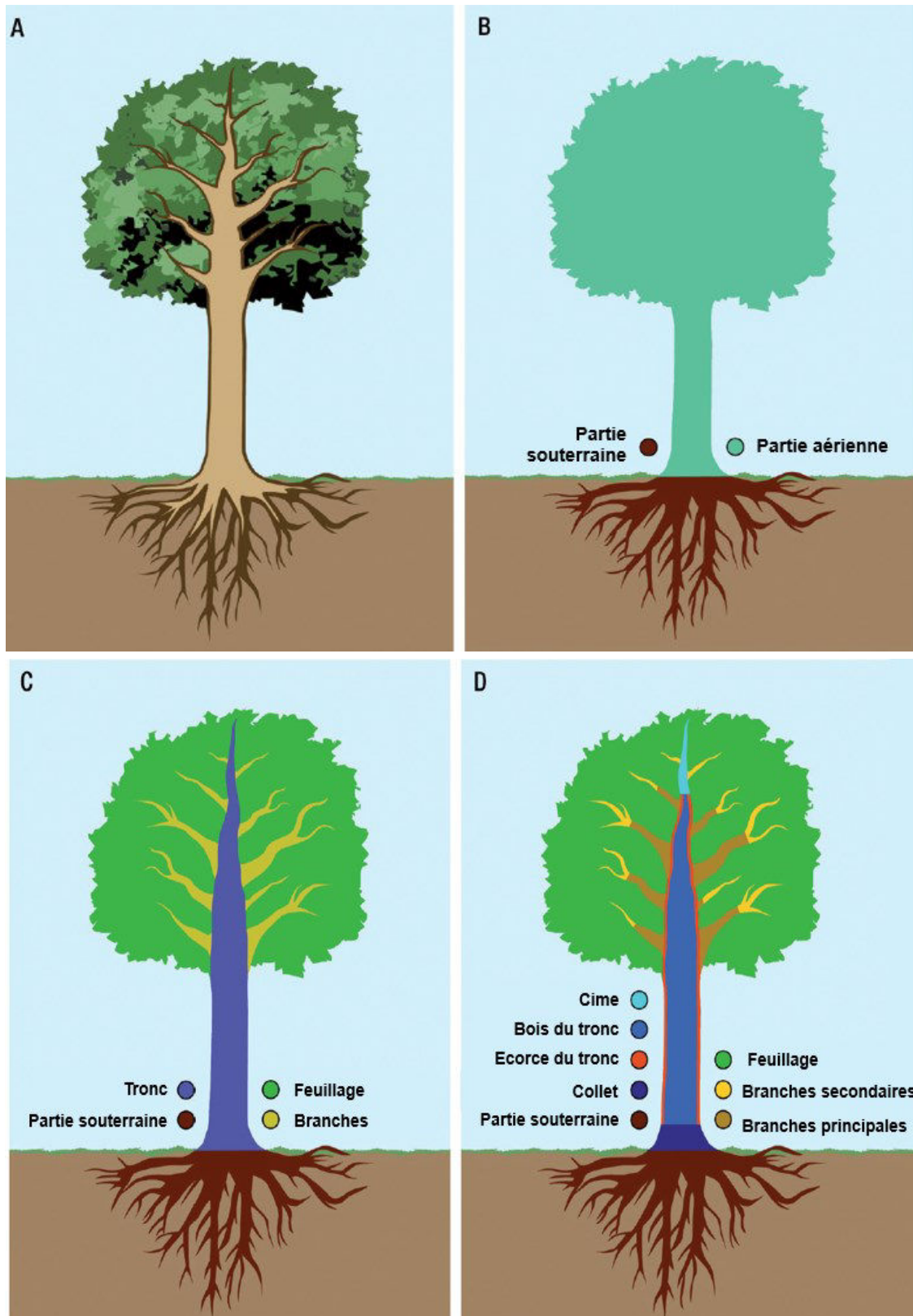


Figure 1. 5 : Proposition de 4 niveaux d'étude (modifié d'après (Gschwantner *et al.*, 2009) : L'arbre dans sa globalité (A) ; Distinction entre la partie aérienne et la partie souterraine (B) ; Distinction entre la partie souterraine et le tronc, les branches et le feuillage (C) ; Distinctions supplémentaires entre l'écorce et le bois du tronc, les branches principales et secondaires ainsi que la cime et le collet (D).

La partie souterraine, difficilement accessible et observable dans son ensemble sans une opération d'extraction, est beaucoup moins étudiée. Des méthodes non-destructives de détection des racines, par exemple par tomographie de résistivité électrique ou acoustiques, sont toujours à l'essai (Amato *et al.*, 2008; Mary *et al.*, 2013, 2016). Ici aussi, différents niveaux d'études sont possibles : les types de racines et les types de systèmes racinaires. Les racines ligneuses charpentières composant le système racinaire assurent un ancrage solide dans le sol (Reubens *et al.*, 2007). Les racines ligneuses de prospections explorent le sol à la recherche de ressources disponibles et enfin des racines plus fines et non ligneuses absorbent et stockent les éléments minéraux et l'eau (Drénou, 2009; Taiz *et al.*, 2015). Les études, moins nombreuses sur les systèmes racinaires, proposent différentes classifications selon la morphologie, l'espèce végétale, le type de racines observées ou la profondeur atteinte par celles-ci (Cannon, 1949; Pages and Aries, 1988; Fitter and Stickland, 1991; Atger and Edelin, 1994; Danjon and Fourcaud, 2009). Une étude plus récente montre que la structure d'un système racinaire n'est pas uniquement liée à l'espèce mais est principalement influencée par la nature du sol et la disponibilité en eau (Zanetti *et al.*, 2014). La suite de l'étude s'appuiera alors sur une classification où sont distingués 4 types de systèmes basés sur des critères morphologiques (Figure I. 6). Cette classification a déjà été utilisée dans le cadre d'études des systèmes racinaires implantés dans les ouvrages hydrauliques (Zanetti *et al.*, 2008; Zanetti, 2010; Mériaux *et al.*, 2015).



Figure I. 6 : Présentation des 4 types de systèmes racinaires (Zanetti *et al.*, 2014) : Système traçant (ou superficiel) où les racines se développent à faible profondeur (a) ; Système fasciculé où les racines n'ont pas de direction préférentielle et forment une boule homogène (b) ; Système mixte qui combine des systèmes pivotant et traçant (c) ; Système pivotant marqué par la présence de plusieurs racines verticales de fort diamètre (d).

2.2.2. Structure interne

La structure interne du tronc et des tiges matures s'organise en couches circulaires de tissus végétaux secondaires plus ou moins visibles à échelle macroscopique (Figure I. 7). On distingue trois types de tissus :

- Les tissus de revêtement ayant un rôle protecteur des surfaces externes
- Les tissus fondamentaux qui assurent la photosynthèse, le stockage ou le soutien
- Les tissus conducteurs de sève

La partie la plus interne, le bois de cœur (aussi nommé duramen) assure un soutien mécanique mais n'exerce aucune fonction de stockage ou de conduction contrairement à l'aubier qui constitue la couche suivante. En effet, en plus d'assurer le soutien, l'aubier est également constitué de cellules parenchymateuses permettant le stockage de substances énergétiques. Les cernes les plus externes du bois d'aubier formant le xylème conduisent la sève brute composée d'eau et de sels minéraux uniquement dans un sens ascendant depuis les racines vers les parties aériennes de la plante (Raven *et al.*, 2011; Taiz *et al.*, 2015). L'enveloppe suivante, le cambium, composée de cellules méristématiques produit le xylème vers l'intérieur du tronc et le phloème vers l'extérieur. Ce dernier conduit la sève élaborée composée de sucres (issus de la photosynthèse) vers les racines ainsi que les autres organes de la plante. Une seconde couche de cellules méristématiques, nommée phellogène, produit le liège vers l'extérieur et le phelloderme vers l'intérieur. L'écorce, constituée de tissus morts, est la couche la plus externe protégeant l'ensemble des tissus.

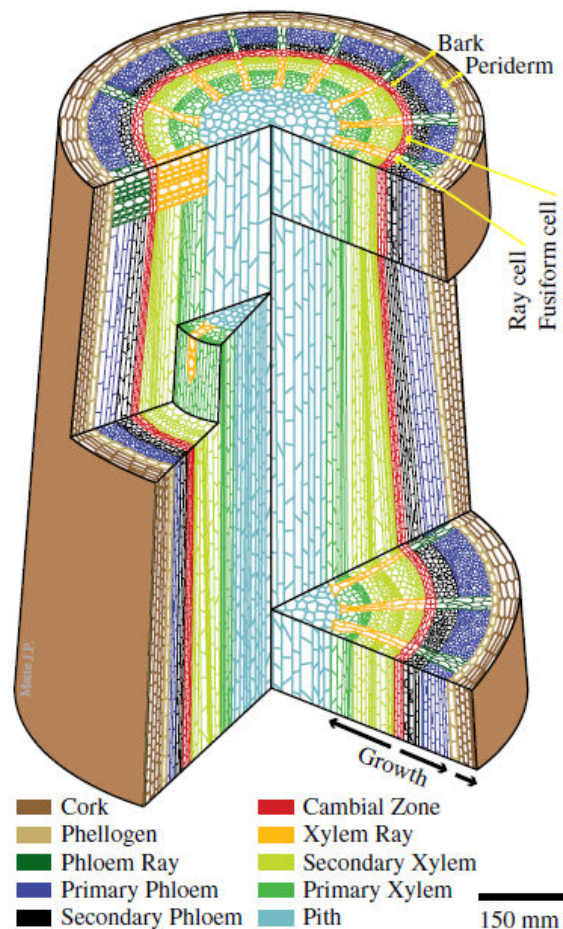


Figure I. 7 : structure interne d'une tige de plante ligneuse (Risopatron *et al.*, 2010).

2.2.3. Etat de santé

Il ne faut pas confondre l'état de santé avec le stade de développement (juvénile, adulte, mature, sénéscent). L'état de santé d'un arbre indique sa vitalité, un arbre peut ainsi être sain, dépérissant, malade ou mort. Par exemple, un arbre dépérissant est un arbre où l'on observe une détérioration de sa santé générale et dont la cause n'est pas identifiée ou pas immédiatement identifiable avec certitude (Drénou, 2016). Cependant, il n'est pas forcément condamné car il a une capacité de résilience. Mais lorsque l'arbre subit une répétition de stress, il peut arriver à un point de non-retour (Nageleisen, 1993).

Pour rendre compte de l'état de santé d'un arbre, les observateurs se basent sur des systèmes de classification en fonction de divers critères. Ces classifications se basent principalement sur l'appréciation de la densité et l'état du houppier (Nageleisen, 1993; Knight *et al.*, 2014) mais peuvent également se baser sur d'autres critères comme la structure des ramifications (Woodcock *et al.*, 1995). Le choix de la classification est important car celle-ci ne sera pas adaptée à toutes les études, elle pourra par exemple être ajustée en fonction des espèces étudiées et du sujet de recherche.

Cependant, l'état de santé d'un arbre peut évoluer dans le temps, tout comme le stade de développement, c'est pourquoi le résultat d'une observation ne peut être valable qu'au moment de l'observation même. Par exemple, un arbre malade abattu n'est pas forcément condamné à mourir, et comme cela sera développé par la suite, les feuillus ont la capacité à se reproduire de manière végétative. Ainsi, la coupe ou la mort de la partie aérienne ne signifie pas que la partie souterraine est également dévitalisée, et bien souvent la coupe renforce le système racinaire et de nouvelles pousses apparaissent depuis la souche (les rejets) ou depuis les racines (drageons).

Cette étude ayant pour objectif de développer des méthodes de dévitalisation des ligneux, les résultats seront basés sur l'état de santé des arbres traités. L'objectif étant de vérifier que la partie racinaire non accessible est également dévitalisée, une classification basée sur l'observation du feuillage du port principal mais également sur l'apparition de rejets ou drageons sera utilisée pour constater l'état de santé des arbres.

2.2.4. Stades phénologiques

La phénologie est l'étude de l'apparition d'événements périodiques dans le monde vivant. Chez les végétaux, le principal objectif de cette science est de comprendre les effets du climat sur le développement des plantes (Schnelle and Volkert, 1974). Le photopériodisme, les amplitudes thermiques (températures jours/nuits), les prédispositions génétiques et l'état de santé peuvent faire varier le stade phénologique des arbres. Par exemple, des peuplements intra-spécifiques peuvent être observés à des stades phénologiques différents durant la même période selon leurs implantations géographiques (Lebourgeois *et al.*, 2006a). Les phénophases les plus connues sont facilement observable à l'œil nu :

- Le débourrement (aussi nommé bourgeonnement) : période où les bourgeons vont sortir de dormance et commencer à grossir
- La frondaison : période à laquelle les feuilles commencent à sortir (également nommée feuillaison)
- La floraison : période où les fleurs commencent à éclore
- Fructification : période de transformation des fleurs en fruits
- La sénescence foliaire : période où l'on peut observer un jaunissement puis une chute des feuilles

- La dormance : période où la croissance et le développement végétal sont ralentis voire stoppés.

Certaines Phases peuvent aussi être découpées en Phases intermédiaires mais elles ne sont pas toutes aussi visibles. Par exemple, la dormance, qui débute à la fin de l'automne et se termine au début du printemps, peut se découper en trois Phases : la paradormance, l'endodormance et l'écodormance (Welling and Palva, 2006).

Depuis les années 1950, des études menées sur le changement climatique ont été croisées avec des études portant sur la phénologie des arbres. Il a ainsi été observé que la saison de végétation commençait plus tôt et se terminait plus tard, ce qui impacte les processus de résistance au froid et de débournement (Lebourgeois et al., 2006b). La période d'ajustement à la sensibilité au gel se voit alors dérégulée et les arbres risquent d'être plus sensibles au gel.

Afin de mener à bien cette étude, il sera important de tenir compte des stades phénologiques et des saisons plus ou moins vulnérables aux arbres.

2.3. Processus physiologiques et mécaniques des flux de sève

Ce paragraphe met en exergue les connaissances autour des essences ligneuses à une échelle plus fine que précédemment. Il s'agit notamment des mécanismes de transport de la sève brute et de la sève élaborée qui représente des processus vitaux aux ligneux. La connaissance des différents tissus et surtout des tissus conducteurs de sèves sera importante car, comme cela sera expliqué plus loin, certaines méthodes de dévitalisation pourraient agir directement sur le transport des éléments vitaux à la plante. De plus, il sera important de connaître les variations de flux de sève qui pourraient impacter le résultat des méthodes de dévitalisation testées.

2.3.1. Potentiel hydrique et flux de sève brute

Chez les végétaux, le transport de l'eau au travers des membranes des cellules est gouverné par le potentiel hydrique. Utilisé pour mesurer le statut hydrique d'une plante, il représente l'énergie potentielle des molécules d'eau et est influencé par trois facteurs majeurs :

- Le potentiel osmotique
- Le potentiel hydrostatique
- Le potentiel de gravité

L'énergie libre des molécules d'eau à l'intérieur des cellules est plus faible que celle des molécules d'eau pure dans des conditions standard, c'est pourquoi les cellules végétales ont généralement un potentiel hydrique négatif (Taiz and Zeiger, 2010). Comme le potentiel hydrique des solutions contenues dans les cellules avoisinantes change, l'eau entre et ressort des cellules par phénomène d'osmose qui ne nécessite aucune énergie, c'est un transport passif. Couplée à un mouvement de solutés, l'eau peut traverser les membranes semi-perméables. Ainsi le transport de sucres, d'acides aminés ou d'autres molécules est assuré par différentes membranes protéiques qui peuvent acheminer jusqu'à 260 molécules d'eau par molécules de soluté transportées (Loo et al., 1996).

Le potentiel hydrique varie au sein de la plante et en fonction de ses conditions de croissance, il diminue depuis le sol jusqu'au sommet de l'arbre. Pour pallier aux variations du potentiel hydrique, il existe différentes stratégies induites par les plantes. Durant les périodes de sécheresse par exemple, elles sont capables de réguler leur croissance et les mécanismes de photosynthèse afin de limiter les pertes en eau (Reddy et al., 2004). Mise à part l'élongation racinaire qui sera d'autant plus stimulée,

l'arrêt de l'expansion cellulaire reste la stratégie la plus utilisée lors de déficit hydrique. En effet, la plante dépense de l'énergie afin d'accumuler des solutés dans les cellules pour garder leur turgescence. Cela implique alors d'investir dans la croissance des organes non photosynthétiques telles que les racines pour augmenter l'assimilation de l'eau ou construire des vaisseaux de xylèmes capables de résister à de fortes pressions négatives (Hsiao and Xu, 2000; Sánchez-Calderón et al., 2013). D'autres plantes se sont adaptées à leur milieu limité en eau comme les plantes halophytes qui ont typiquement un très faible potentiel osmotique, inférieur au potentiel hydrique de la cellule, mais qui reste suffisant pour permettre aux cellules racinaires d'extraire l'eau de la solution saline présente en milieu salin (Apse and Blumwald, 2007; Hanana et al., 2011).

Maintenir un potentiel hydrostatique positif est aussi important car la croissance et le maintien des cellules végétales nécessitent une pression de turgescence pour étirer les membranes des cellules. La chute du potentiel hydrostatique dans des conditions de perte en eau peut en partie expliquer en quoi la croissance des cellules est si sensible au stress hydrique. Une plante va flétrir lorsque la pression de turgescence dans les cellules est nulle. Plus la perte d'eau au niveau des cellules est grande, plus les membranes vont se déformer ce qui aura pour conséquence d'endommager les cellules. De plus, le potentiel hydrostatique positif est important car il augmente les mécanismes de rigidité des cellules et des tissus. Il y a des molécules de signalisation d'activation d'élongation dans la membrane du plasma qui permettent de changer le volume de la cellule en fonction du statut hydrique au lieu de répondre directement par la pression de turgescence.

Afin de maintenir un potentiel hydrique stable, il est vital pour un arbre de puiser l'eau dans le sol et de la faire parvenir jusqu'à son feuillage où les molécules d'eau vont pouvoir être utilisées lors de la photosynthèse (Venturas *et al.*, 2017). En 1727, les expériences menées par Stephen Hales font de lui le précurseur de l'étude des gaz et des flux de sèves chez les végétaux. Puis en 1914, Henry Dixon reprend ses travaux autour de la transpiration et de la montée de sève en expliquant que l'eau est tirée vers le haut en étant soumise à des pressions négatives importantes. Il marque alors les débuts de l'étude du potentiel hydrique chez les végétaux avec l'invention de la chambre de pression (Cruziat, 2007). Sa théorie de « cohésion-tension » repose sur des notions de physique simples où les molécules d'eau circulent dans une colonne d'eau ininterrompue. Ces molécules d'eau vont s'évaporer des feuilles lors de la transpiration et seront remplacées par d'autres en amont qui remonteront vers les feuilles par un mécanisme d'aspiration sans aucune dépense d'énergie (Figure I. 8).

Cependant les études autour de ces mécanismes de montée d'eau ont fait l'objet de controverses (Brown, 2013; Cruziat, 2007; Steudle, 2002; Pickard, 1981). En effet, selon les lois de l'hydrostatique cette théorie ne fonctionnerait pas pour les arbres de très grande taille (Brown, 2013; Drénou, 2016). En effet, le phénomène de cavitation est alors observé lorsque la colonne d'eau en surpression est rompue par la formation de bulle d'air dans le xylème, il s'agit de l'embolie estivale (Cruziat *et al.*, 2002; Vilagrosa *et al.*, 2012). Même si la théorie de « cohésion-tension » est à présent majoritairement admise par la communauté scientifique, l'ascension de l'eau serait également couplée à d'autres mécanismes comme la poussée racinaire et la transpiration.

La poussée racinaire se produit lors de l'accumulation de solutés dans les racines entraînant l'augmentation de la concentration en ions dans les cellules. En effet, l'accumulation de solutés dans la sève brute conduit à une diminution du potentiel osmotique du xylème ainsi que de son potentiel hydrique. Ce faible potentiel hydrique induit une absorption de l'eau afin de remonter le potentiel hydrostatique du xylème. C'est un transport actif nécessitant l'apport d'énergie à l'inverse du mécanisme de « cohésion-tension » (Singh, 2016). Par phénomène d'osmose, l'eau est alors puisée dans le sol par les poils absorbants présents sur les racines et se dirige vers les cellules les plus concentrées en solutés. Ce mécanisme se déroule tout au long de la journée et de la nuit

indépendamment de la transpiration (Canny, 1995; Taiz *et al.*, 2015). Cependant la poussée racinaire ne suffit pas à elle seule à faire monter l'eau au sommet des arbres.

La transpiration est l'évaporation constante d'une partie de l'eau contenue dans la plante par ses feuilles. Compte tenu du faible taux de perméabilité de la cuticule sur les feuilles, l'évaporation se fait principalement par les stomates. Le rôle des stomates dans l'évaporation est couplé à l'absorption du CO₂ nécessaire à la photosynthèse. Le phénomène de transpiration n'a lieu que le jour et dépend principalement des conditions climatiques (Bréda *et al.*, 2006; Drénou, 2016). Les stomates ont la particularité de se bomber lorsqu'elles sont turgescentes et forment ainsi une ouverture : l'ostiole. Différents mécanismes régulent l'ouverture et la fermeture des stomates (Frechilla *et al.*, 2000; Lawson, 2009). Durant la journée, l'augmentation de la température entraîne l'évaporation de l'eau, stockée dans les tissus des feuilles, par les stomates maintenus ouverts. Puis en période de sécheresse, les cellules stomatiques ne sont plus turgescentes et restent donc fermées, ce qui permet de maintenir le statut hydrique de la plante.

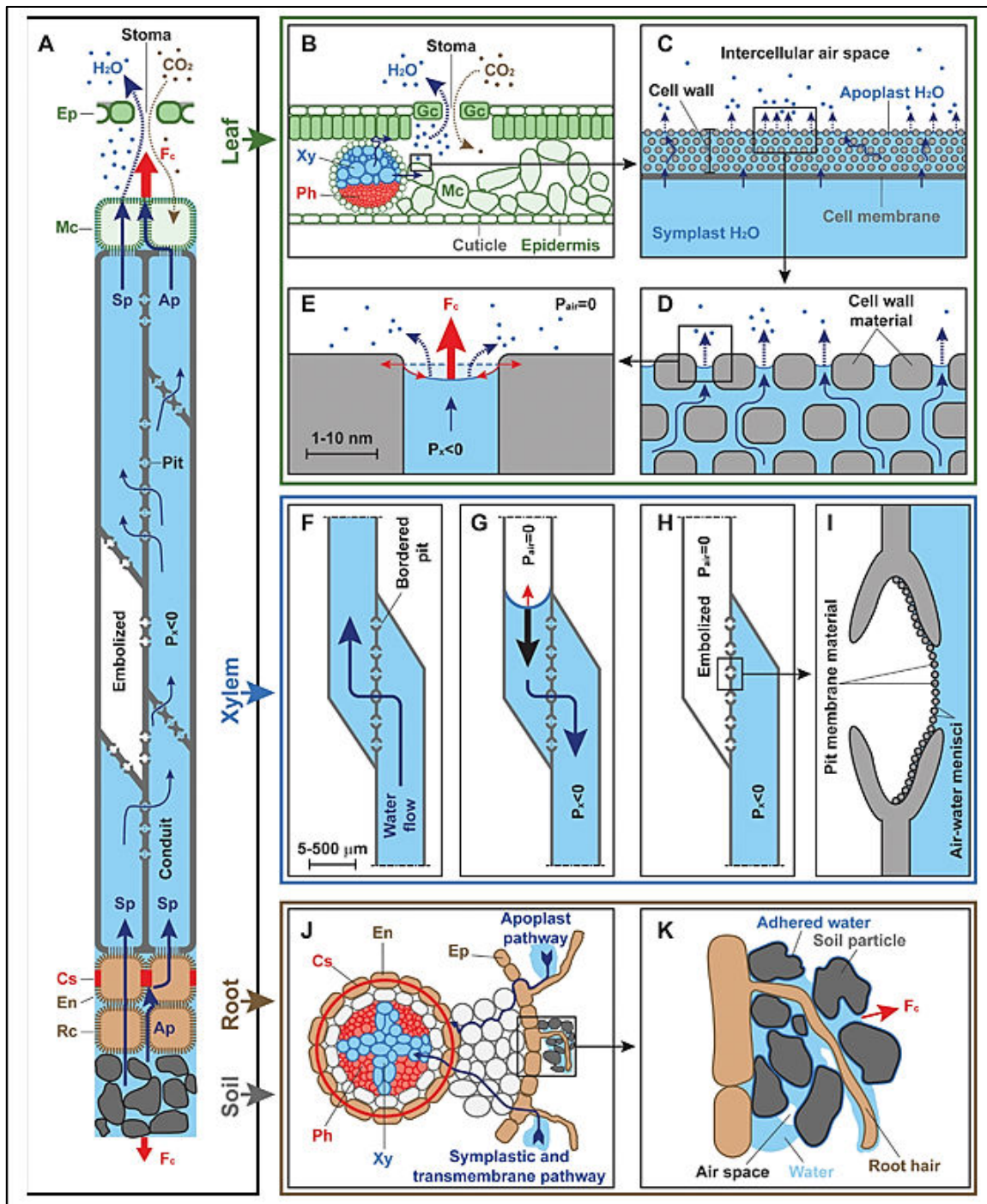


Figure 1.8 : Schémas explicatifs du mécanisme de « cohésion-tension » impliqué dans la montée de sève chez les végétaux (Venturas *et al.*, 2017). (A) Schéma de la colonne d'eau depuis le sol vers les feuilles. L'eau est tirée (flèches bleues) depuis le sol jusqu'à la surface d'évaporation située sur les feuilles par le potentiel hydrique négatif créé par les parois cellulaires par forces de capillarité (flèches rouges F_c). Ces forces font bouger l'eau jusqu'au mésophylle des feuilles (Mc) au travers du xylème par voies symplastique et transmembranaire (Sp), par voie apoplastique (Ap), ou une combinaison des deux. Les mouvements d'eau dans le xylème ont lieu au travers du réseau de conduits qui doivent être saturés en eau pour fonctionner (risques d'embolies). Au niveau de l'endoderme (En), où l'eau est filtrée, les bandes de Caspary (Cs) bloquent la voie Ap. Mais au travers des cellules des racines (Rc), l'eau bouge depuis le sol jusqu'au xylème racinaire par voies Ap et Sp. L'épiderme (Ep) et les stomates contrôlent ensuite l'évaporation des molécules d'eau (flèches brisées bleues) et l'assimilation du CO_2 (flèches brisées marrons) par diffusion à partir des variations de pression. (B) Section transversale d'une feuille montrant que le taux d'évaporation au niveau des parois

cellulaires des feuilles est largement contrôlé par l'ouverture des cellules stomatiques (Gc). (C) Surface d'évaporation des parois cellulaires de la feuille. (D) Les ménisques d'eau sont maintenus par une tension de surface et par les matériaux hydrophiles constituant les membranes des cellules. (E) Zoom sur un ménisque d'eau illustrant l'origine des forces de capillarité (Fc). L'adhésion de l'eau aux parois (flèches horizontales rouges) s'effectue depuis les bords du ménisque. L'évaporation (flèches en pointillés bleues) cause le retrait du ménisque d'eau ce qui augmente sa surface de courbure. La surface de tension résiste à la courbure en poussant le ménisque à revenir à sa surface d'équilibre (lignes en pointillés bleues), ce qui exerce une pression qui rabaisse la pression hydraulique derrière le ménisque. Cette pression se propage de cellule en cellule (A) ce qui fait monter l'eau depuis le sol. (F) Les vaisseaux du xylème sont connectés entre eux par zones de perforations ou des ponctuations. Ils permettent de s'opposer aux flux mais constituent aussi un système de sécurité. (G) Si de l'air s'introduit dans ces vaisseaux, les forces de capillarité ne sont plus suffisamment fortes pour retenir la colonne d'eau car le conduit sera trop large. (H) L'eau se retirera alors dans les tissus adjacents et le vaisseau sera embolisé et non fonctionnel pour le transport de l'eau. (I) Les membranes des ponctuations sont formées de tissus modifiés des cellules primaires des parois cellulaires ; elles évitent la propagation de l'air dans le xylème en régénérant les mêmes forces de capillarité que les ménisques formés au niveau des parois du mésophylle. (J) Section transversale d'une racine montrant les mouvements d'eau du sol vers le xylème racinaire. L'endoderme (En), où les bandes de Caspary stoppent le mouvement apoplastique, force l'eau à circuler par voie endodermique par osmose inverse. (K) Schéma de l'eau puisée dans le sol par capillarité qui force ensuite l'eau à remonter dans la plante. Le mécanisme de « tension-cohésion » est un bras de fer entre les forces de capillarité des feuilles et le sol pour maintenir la colonne d'eau.

2.3.2. Flux de sève élaborée

Contrairement à la sève brute, la sève élaborée circule via les tissus vivants du phloème depuis les feuilles (organes sources) vers les autres organes non photosynthétiques de la plante (organes puits et organes de stockage). Il a été observé que son mouvement pouvait être bidirectionnel entre deux tubes criblés, tissus conducteurs constituant le phloème propre aux angiospermes. Cependant, ce transport bidirectionnel n'a pas été observé au sein du même tube criblé (Zimmermann and Milburn, 2012; Taiz *et al.*, 2015). La sève élaborée est principalement constituée de saccharose et d'autres sucres issus de la photosynthèse, d'hormones végétales et de diverses macromolécules (Dinant, 2008; Turgeon and Wolf, 2009), elle est donc plus visqueuse que la sève brute. Les tubes criblés étant également bien plus petits (les éléments de sève du phloème chez les angiospermes mesurent par exemple entre 100 et 500 μ de long) la sève élaborée se déplace ainsi bien plus lentement (Thompson, 2006; Zimmermann and Milburn, 2012).

Les tubes criblés sont constitués de cellules empilées (nommés « éléments de tubes criblés ») dont les parois sont perforées. Les éléments de tubes criblés sont accolés à des cellules compagnes dont les fonctions sont principalement métaboliques (Bonnemain and Fromard, 1987). Le passage des sucres dans les tubes criblés depuis les organes sources est un transport actif, il s'agit du chargement du phloème. Ce dernier fait intervenir des transporteurs protéiques situées dans les membranes des tubes criblés pour y faire entrer les solutés issus de la photosynthèse. Une fois dans le phloème, une majorité d'études explique le déplacement de la sève élaborée par la théorie proposée en 1930 d'Ernst Mûch du flux sous pression (Figure I. 9) (Thompson, 2006; Windt *et al.*, 2006; Bowes and Mauseth, 2012). Il s'agit d'un transport passif, les tissus du phloème étant fortement concentrés en solutés, l'eau présente dans le xylème se déplace latéralement vers le phloème par osmose. L'augmentation du potentiel hydrique augmente la turgescence des tubes criblés et entraîne alors le déplacement de la sève élaborée vers les organes puits. Le déchargement du phloème se fait de nouveau par un transport actif pour faire entrer les sucres dans les organes puits ou de stockage (Dinant, 2008; Drénou, 2016).

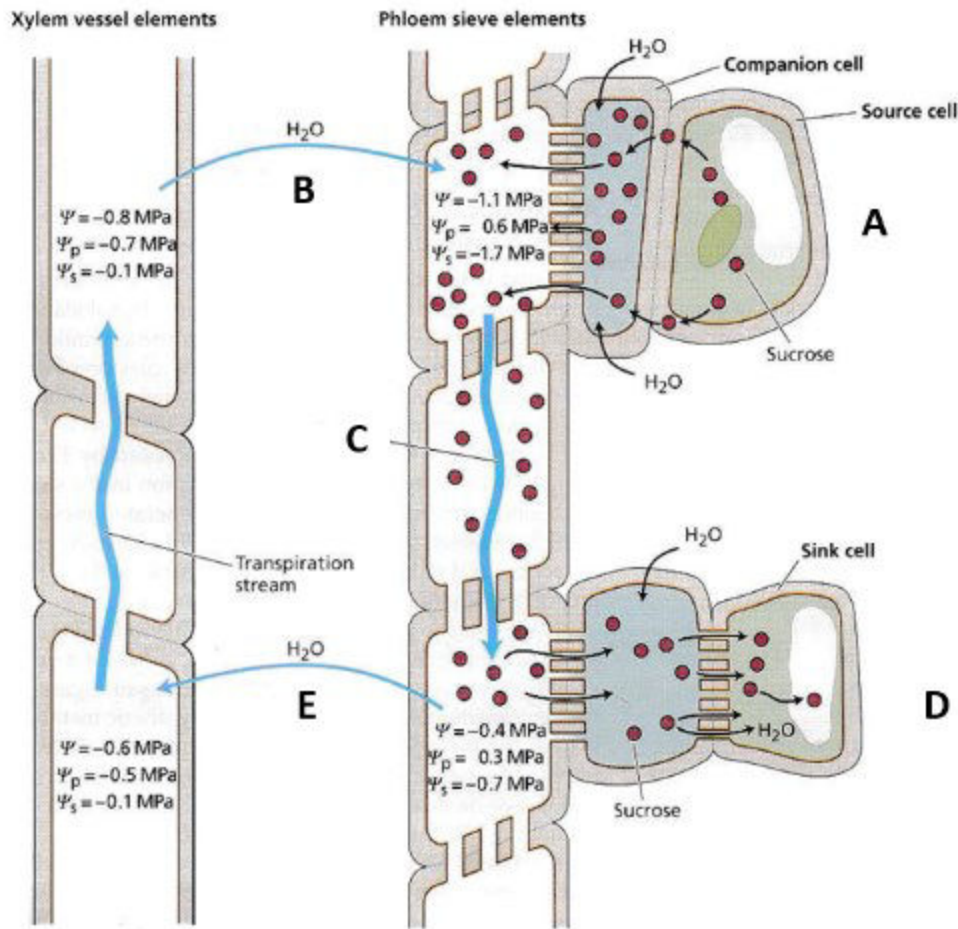


Figure I. 9 : Schéma présentant la théorie des flux sous pression durant la translocation dans le phloème (Taiz *et al.*, 2015). Des valeurs sont proposées pour le potentiel hydrique (Ψ), le potentiel osmotique (Ψ_s) et le potentiel hydrostatique (Ψ_p) qu'il y aurait au niveau des tissus du phloème et du xylème. (A) Les sucres (cercles pleins rouges) issus des organes sources sont activement chargés dans les cellules compagnes et les éléments de tube criblé. (B) le chargement actif dans les éléments de tube criblé rabaisse le potentiel osmotique, l'eau passe alors du xylème vers le phloème par osmose ce qui augmente le potentiel hydrostatique. (C) Le flux de pression déplace passivement l'eau et les solutés vers les autres éléments de tubes criblés en direction des organes puits. (D) Les sucres sont ensuite déchargés dans les organes puits. (E) Une fois le phloème déchargé de ses sucres, le potentiel osmotique remonte et l'eau se déplace du phloème vers le xylème par osmose, ce qui diminue le potentiel hydrostatique.

Le phloème constitue également une voie de signalisation et de transport à longue distance des phytopathogènes. Lorsqu'une plante est attaquée, un signal de défense parcourt le phloème où des gènes de défense et d'autres métabolites sont ensuite acheminés vers les organes pas encore touchés par l'attaque, il s'agit de la « Systemic Acquired Resistance » (Van Bel and Gaupels, 2004).

Compte tenu des différentes fonctions vitales qu'il assure et de sa composition en cellules vivantes, le phloème est bien plus vulnérable que le xylème. La taille infime des vaisseaux du phloème, la forte pression de turgescence et la diffusion libre de l'eau au travers des différents tissus végétaux, entre autres, complexifient l'étude et la mesure du flux de sève élaborée (Gomez *et al.*, 2003; Windt *et al.*, 2006; Zimmermann and Milburn, 2012).

2.3.3. Variations saisonnières des flux de sève

Les études portant sur les ligneux sont peu nombreuses mais il a bien été observé des variations de pressions au niveau du xylème durant le printemps et l'automne chez certaines espèces comme l'érable, le noyer et le bouleau (Sperry *et al.*, 1988; Zhu *et al.*, 2000; Ewers *et al.*, 2001). Lors du gel des cellules durant l'hiver, il arrive que l'air solubilisé dans la sève brute ne soit pas pris dans la structure cristalline de la glace et forme des bulles d'air. Lorsque la sève est sous tension lors de gel-dégel répétés, les bulles se dilatent jusqu'à emboliser le xylème. La « montée de sève » au printemps lié à la surpression hydrique permettrait de chasser les bulles d'air à l'origine d'embolies hivernales (Hacke and Sauter, 1996; Zhu *et al.*, 2000; Vilagrosa *et al.*, 2012). Dans la littérature grise et surtout en arboriculture, on parle de « montée de sève » et parfois aussi de « descente de sève », or l'origine de cette expression populaire ne dépend pas du sens de transport de la sève dont les mécanismes ont été présentés plus haut (voir 2.3.1.). Au printemps, la sève chargée en sucres solubles au niveau des racines est soumise à une plus grande pression lorsque les sols sont humides, les flux de sèves jusqu'alors ralentis durant la dormance reprennent une activité normale d'où l'expression « sève montante » (Drénou, 2016). Il s'agit en réalité d'une poussée racinaire plus forte que les poussées racinaires habituelles dont le rôle est de chasser les bulles d'air formées durant le gel et de rétablir la colonne d'eau (Hopkins, 2003). A l'automne, lorsque les journées raccourcissent et les températures s'abaissent, les flux de sèves diminuent de nouveau. Ce phénomène n'a pas été étudié chez toutes les essences ligneuses et ne peut donc être généralisé surtout que d'autres stratégies ont également été observées. Par exemple, la fabrication de nouveaux tissus conducteurs de sève avant le débourrement a été observée chez le Chêne ainsi que le Frêne, en l'absence de « montée de sève » ces nouveaux vaisseaux garantissent la circulation de la sève malgré l'embolie hivernale (Hacke and Sauter, 1996).

La distribution géographique des arbres dépend souvent de leurs capacités à résister ou s'adapter aux basses températures et surtout au gel. Le stress lié aux faibles températures n'est significatif qu'aux plantes exotiques mais le stress lié à la formation de gel a un effet sur l'ensemble des végétaux surtout sur les parties pérennes (Charrier, 2011). L'hiver, l'eau contenue dans les tissus végétaux, soumise au risque du gel, peut être à l'origine de stress et diverses lésions plus ou moins graves comme l'embolie hivernale abordée plus haut. Lorsqu'il y a un stress thermique d'autres stress entrent en jeu comme le stress hydrique, le stress osmotique, et le stress mécanique. C'est pourquoi diverses stratégies d'acclimatation au froid sont mises en place par les arbres (Figure I. 10).

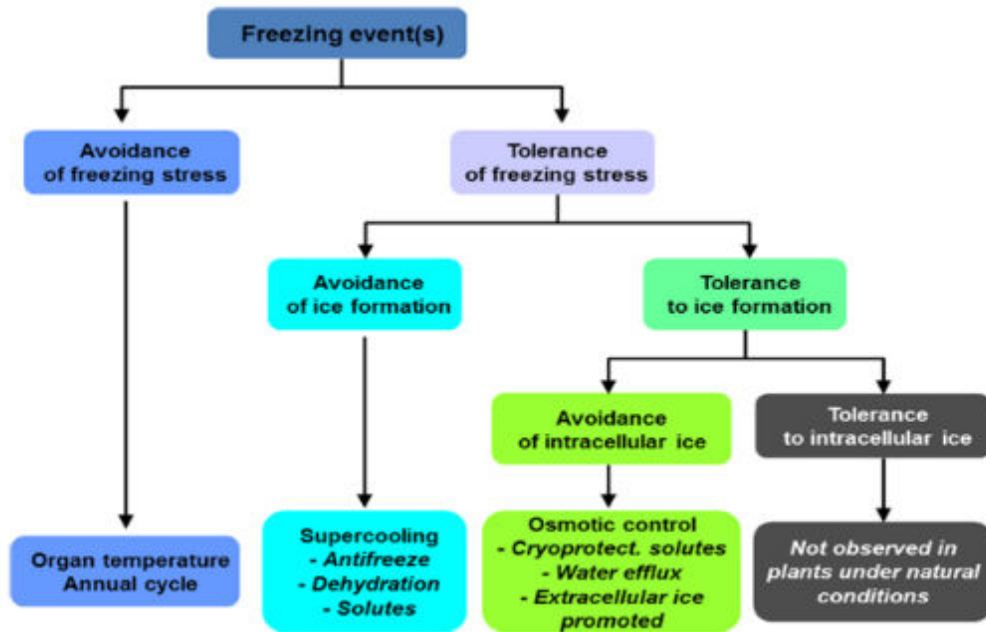


Figure I. 10 : Stratégies développées par les arbres pour éviter ou tolérer le stress lié au froid et la formation de cristaux de glace (Charrier *et al.*, 2015).

Parmi ces stratégies, l'évitement du stress lié au froid est possible avec la mise en place d'événements annuels biologiques influencés par le climat. Déjà abordés plus haut (cf. 2.2.4., Partie I), les stades phénologiques de la sénescence foliaire et de dormance sont des mécanismes d'acclimatation au froid qui entrent en jeu lorsque les températures et le temps d'ensoleillement s'amenuisent. De même, les Phases de débourrement, feuillaison, croissance des tiges et floraison sont déclenchées dès le printemps ce qui permet d'éviter l'exposition au gel. Par ailleurs, afin de pallier à l'absence de production de sucres lors de l'arrêt de la photosynthèse en Phase de dormance et ainsi éviter la formation de glace dans les tissus, des variations saisonnières des réserves en sucres solubles sont également observées chez les essences ligneuses. Comme expliqué précédemment, les sucres et autres produits de la photosynthèse sont acheminés via le phloème vers les organes puits pour être directement consommés ou bien vers les organes de réserve pour être stockés. En effet, les réserves, principalement constituées de glucides, lipides, acides aminées et protéines, seront utilisées au printemps suivant pour la sortie des nouvelles feuilles et la croissance des autres organes, avant que la photosynthèse ne reprenne le relais (Sauter, 1980; Loescher *et al.*, 1990; Witt and Sauter, 1994). Les réserves stockées dans les cellules parenchymateuses du bois permettent également aux cellules de s'acclimater au froid durant l'hiver (Figure I. 10). En effet, la sortie d'eau et l'accumulation des sucres solubles dans les cellules permettent par divers mécanismes (osmotiques, métaboliques et cryoprotectant) d'abaisser le point de fusion et d'éviter la formation de glace dans le milieu intracellulaire très sensible (Morin *et al.*, 2007; Poirier, 2008) (Figure I. 11). Des études portant sur les organes de stockage ont d'abord montré que les racines étaient le principal lieu de stockage des réserves, toutefois il s'agissait de recherches menées sur de jeunes arbres et les résultats ne pouvaient s'extrapoler aux arbres matures (Sauter and Cleve, 1994; Barbaroux *et al.*, 2003). En effet d'autres études menées sur des arbres forestiers adultes ont montré que les réserves se trouvaient principalement dans les cellules parenchymateuses constituant le bois du houppier et du tronc (Sauter and Cleve, 1994; Landhäusser and Lieffers, 2003). En général, plus un arbre est âgé plus sa biomasse en tissus aériens augmente. La répartition des réserves dans les tissus de stockage semble être principalement influencée par la biomasse des organes de stockage. Ainsi, même si les réserves sont

plus concentrées dans les tissus racinaires, la quantité de réserve reste plus élevée dans les parties aériennes des arbres adultes (Barbaroux *et al.*, 2003).

Les réserves accumulées durant l'année sont vitales pour les essences ligneuses pour passer l'hiver et sortir de la dormance au début du printemps. Avec le réchauffement climatique, les stades phénologiques ainsi que la sortie de dormance sont avancés. L'automne et le printemps sont des périodes critiques où l'impact du gel sur les arbres risque alors d'être d'autant plus catastrophique si les stratégies d'acclimatation ne sont pas complètement établies (Morin *et al.*, 2007).

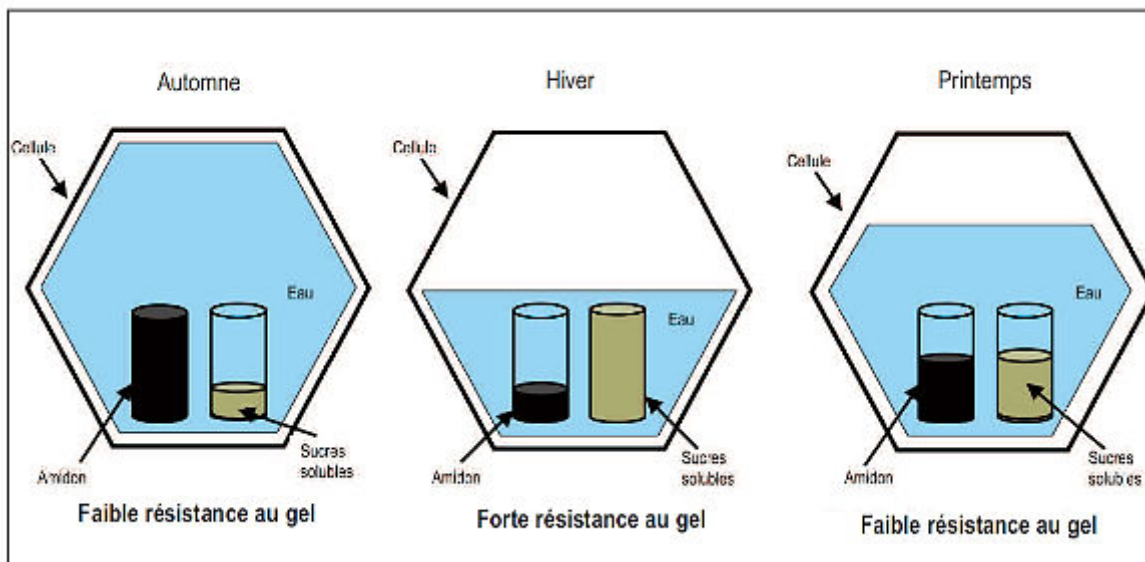


Figure I. 11 : Schéma présentant les distributions des réserves en amidon (issus des glucides), en sucres solubles et la proportion d'eau présente dans les cellules parenchymateuses au fil des saisons (Bonnardot, 2012). A l'automne, l'amidon est stocké dans les cellules encore saturées en eau. L'amidon est ensuite hydrolysé en sucres solubles donnant un pouvoir antigél aux cellules durant l'hiver. En parallèle, l'eau se déplace à l'extérieur des cellules de manière à ne pas geler le milieu intracellulaire et y augmenter la concentration en sucres solubles. Au printemps, la concentration en sucres solubles diminue et la production d'amidon reprend tandis que les cellules se réhydratent.

2.4. Cycle de vie des essences ligneuses

Pour tenter de maîtriser le développement de la végétation il est important d'avoir des connaissances suffisantes sur leur cycle de vie et les mécanismes de défenses qu'elle peut mettre en place à la suite de perturbations.

2.4.1. Reproduction végétative

Les essences ligneuses concernées dans cette étude sont des essences feuillues appartenant au taxon des angiospermes. Les angiospermes se différencient principalement des gymnospermes par leurs organes reproducteurs condensés formant les fleurs et dont les ovules sont enfermés dans un ovaire permettant une reproduction sexuée. Une autre voie de reproduction via les organes végétatifs non sexués est également possible chez les angiospermes : la multiplication végétative. Il s'agit d'une forme de reproduction où une partie non sexuée de la plante est capable de redonner naissance à une plante entière autonome et génétiquement identique à la plante mère (Photo I. 7 et Photo I. 8). Cependant, dans la littérature scientifique de nombreux termes sont utilisés et pas toujours bien définis, il en est de même pour les traductions parfois incorrectes (Del Tredici, 2001). Par exemple, le fait que la

reproduction végétative produise un individu autonome peut être discuté lorsqu'il s'agit de rejets issus de la souche ou du collet qui ne seront pas réellement autonomes et profiteront du système racinaire déjà présent. En effet, l'apparition d'un nouveau brin reproduisant le modèle architectural de l'arbre mère et dont le système racinaire n'est pas autonome fait référence au phénomène de réitération proposé par Oldeman (Oldeman, 1972; Santos, 1980; Hallé, 1986). Comme la réitération se rapporte principalement à l'architecture des arbres et qu'il est souvent apparenté dans la littérature scientifique à la reproduction végétative (Koop, 1987), ce mécanisme ne sera pas plus développé dans cette étude et les rejets seront considérés comme une forme de reproduction asexuée. Avant de poursuivre, il est tout de même important de redéfinir les principales formes de multiplications végétatives d'après la littérature scientifique et qui seront abordées par la suite (Roussel, 1978; Koop, 1987; Verger, 2000) :

- Rejet : brin issu du développement d'un bourgeon adventif ou proventif situé sur une souche vivante, apparaissant souvent après la coupe de l'arbre et parfois au niveau du collet d'un arbre non coupé (mais élagué par exemple).
- Drageon : pousse produite à partir d'un bourgeon adventif située sur une racine superficielle
- Marcotte : une tige ou une branche aérienne prenant racine au contact du sol. Lorsque l'enracinement est suffisant pour rendre le nouvel individu autonome, il y a séparation du nouvel individu avec l'individu mère.
- Bouture : organe ou fragment d'organe végétal isolé de la plante mère qui produira par la suite un enracinement à l'inverse de la marcotte qui s'enracine avant de devenir autonome.



Photo I. 7 : Rejets issus du collet d'un Peuplier noir implantés dans le bajoyer d'un canal hydraulique. (Photo : Macia J., 2017).



Photo I. 8 : Rejets issus du collet et drageons issus des racines d'un Robinier faux acacia (situé sous un Platane). (Photo : Macia J., 2016).

La reproduction végétative se produit à la suite d'événements où l'arbre subit des dommages plus ou moins graves. La sortie de rejets ou de drageons a ainsi été observée suite à des dégâts endogènes occasionnés par des maladies ou la sénescence de l'arbre mère ou bien exogènes comme des incendies ou des pertes de biomasse (Koop, 1987; Just *et al.*, 2016). L'abattage, la taille, le repage et le déracinement partiel sont également des méthodes mécaniques qui entraînent ce phénomène de reproduction végétative de l'arbre. La perte de la dominance apicale ou de la biomasse nécessaire à la photosynthèse et le manque de luminosité seraient également des événements déclencheurs (Del Tredici, 2001; Zeppel *et al.*, 2015). Encore mal connu, ce phénomène peut donc avoir lieu naturellement (branche cassée, chablis...) mais aussi de manière artificielle, notamment en agriculture

pour la reforestation (Bellefontaine *et al.*, 2001, 2005) ou en génie végétal pour la re végétalisation des berges par exemple (Delage *et al.*, 2017).

Les études autour de la reproduction végétative font l'objet de recensement des espèces capables de drageonner, rejeter et marcotter (Bellefontaine, 2005; Harivel *et al.*, 2006). Mais il est difficile d'émettre des conclusions à ce sujet car les résultats sont variables en fonction des saisons, des espèces, du stade de développement et évoluent d'une année à l'autre. Lorsque les coupes sont réalisées durant la dormance, il a été observé un plus grand nombre de rejets, également plus vigoureux, durant le printemps suivant (Ducrey and Turrel, 1992). Selon d'autres études, plus l'arbre est âgé moins il sera capable de produire des rejets mais les rejets produits seraient plus vigoureux (Monteuuis, 1984; Moreira *et al.*, 2012).

A l'heure actuelle, aucune étude ne vérifie pourquoi certaines espèces ligneuses sont capables de réaliser une multiplication végétative tandis que d'autres en sont incapables (Del Tredici, 2001; Drénou, 2016). Contrairement aux angiospermes, peu de gymnospermes ont cette capacité de reproduction végétative et l'hypothèse de la spécificité propre à chaque espèce semble la plus juste (Zeppel *et al.*, 2015). Les études se basent donc souvent sur une classification dichotomique interspécifique (espèces qui rejettent / espèces qui ne rejettent pas), or des variations intraspécifiques ont été observées sur des espèces classées ainsi (Vesk *et al.*, 2004; Bellefontaine, 2005). Une autre manière d'appréhender ce sujet est de décomposer ce processus en trois étapes afin de mieux comprendre la variabilité intraspécifique du processus de production de rejets (Moreira *et al.*, 2012) (Figure I. 12). Cette classification permet de valider le processus à différentes étapes car il arrive qu'une plante ligneuse produise des rejets et meure malgré tout par la suite en fonction de la taille de la plante et des réserves en sucres solubles disponibles (Zeppel *et al.*, 2015).

Comme expliqué plus haut, l'état de santé d'un arbre n'est pas fixe dans le temps. Il en est de même pour la présence et l'état des rejets et drageons qui seront des paramètres également à prendre en compte. Lors des premiers tests, seule la présence ou l'absence de rejets initiaux sera observée car dans le cas où l'arbre traité produira des rejets, le temps nécessaire à leur production n'est pas encore connu. La mise en place par la suite d'un modèle d'étude prenant en compte également la vigueur des rejets et leur survie dépendra des résultats observés.

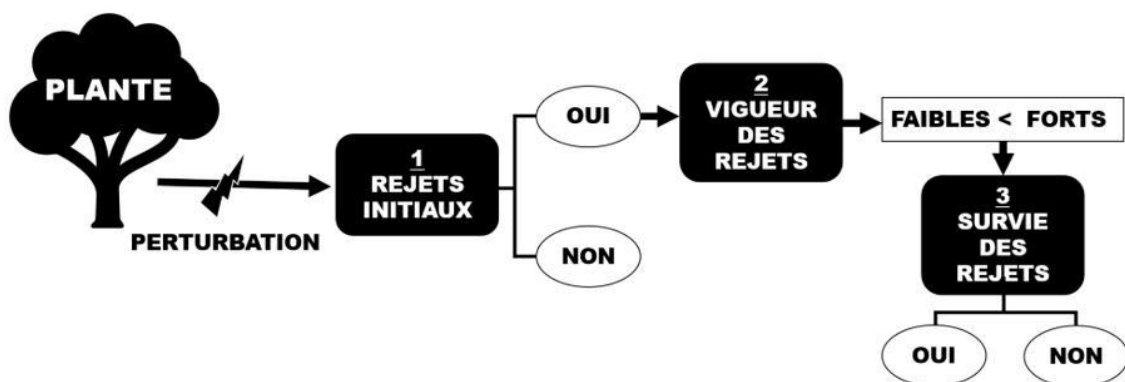


Figure I. 12 : Modèle d'étude du processus de production de rejets en trois étapes (d'après (Moreira *et al.*, 2012). Etape 1 : habilité à produire des rejets ; Etape 2 : vigueur des rejets ; Etape 3 : survie des rejets.

2.4.2. Les essences ligneuses sont-elles immortelles ?

L'objet de cette étude étant de trouver une méthode de dévitalisation des arbres, il est important de définir ce que représente la dévitalisation d'un arbre. En effet, dévitaliser un arbre revient à provoquer la mort de ce dernier. Deux questions semblent donc importantes à éclaircir :

- Qu'est-ce que la mort d'un arbre ?
- Comment vérifier qu'un arbre est mort ?

La définition de la mort d'un arbre peut dépendre de l'objet de l'étude et des paramètres pris en compte telle l'échelle (cellules, tissus, ensemble de l'organisme, peuplement), et n'est donc pas fixe dans la littérature scientifique (Tableau I. 8) (Dreyfus, 1999). Le choix de cette définition est donc primordial pour la suite de cette étude.

Tableau I. 8 : Exemple de quelques définitions de la mort de l'arbre trouvées dans la littérature scientifique.

Définition	Référence de l'étude
« La mort d'un arbre supprime un individu génétiquement distinct mais permet également la production de ressources additionnelles pour l'écosystème. (...), la mort de l'arbre est généralement le résultat d'interactions complexes issues de nombreux facteurs. »	(Franklin et al., 1987)
« La mort est définie comme un équilibre thermodynamique entre l'organisme et l'environnement, dans lequel les plantes n'ont plus de gradient d'énergie pour faire fonctionner le métabolisme ou la régénération »	(McDowell, 2011)
« La mort de l'arbre est la cessation permanente de l'ensemble des fonctions de l'organisme. (...) ; l'ensemble des fonctions de l'organisme étant les interactions hautement complexes. (...) La défaillance des interactions hautement complexes est due à des dommages irréparables sur les interactions et la coordination des organes de transports du xylème et/ou du phloème dans l'arbre. »	(Anderegg et al., 2012)
L'arbre est considéré comme mort lorsque tous ses bourgeons végétatifs sont secs.	(Jordan, 2015)

Peu d'études portent sur la mort naturelle des arbres en considérant leur longévité ainsi que les variabilités intraspécifiques et interspécifiques observées (Bigler and Bugmann, 2004). Dans des conditions favorables, les arbres peuvent parfois vivre plusieurs centaines d'années contrairement à la majorité des espèces animales (Thomas, 2013). En effet, les angiospermes sont capables de se reproduire de manière végétative entraînant alors la formation de nouveaux individus génétiquement identiques, ce qui ne valide pas la première définition du Tableau I. 8. Certains scientifiques en sont ainsi venus à se demander si les arbres n'étaient pas immortels (Peñuelas and Munné-Bosch, 2010; Drénou, 2016). Les cas de mortalité chez les végétaux ligneux sont plus fréquemment observés à la suite d'une accumulation de stress exogènes (compétition, pathogène, climat, herbivorie, manque de ressources, etc.) qu'à une mort naturelle (Nageleisen, 1993; Jordan, 2015). Avant cette dernière, le végétal passe par le stade sénescence, dernier stade de son développement où le végétal perd lentement ses capacités de survie (Salguero-Gómez *et al.*, 2013). Mais les processus précédant la mort naturelle d'un végétal sont encore peu connus et peuvent prendre plusieurs mois voire plusieurs années.

Par ailleurs, le problème majeur rencontré par les scientifiques sur ce sujet est le manque de procédure de validation (Bigler and Bugmann, 2004). En effet, les définitions données dans le Tableau I. 8 ne donnent pas tous les outils qui permettront de vérifier si un arbre est bel et bien mort. La présence de champignons et de moisissures peuvent être des paramètres de validation (Kacprzyk *et al.*, 2014) mais les processus de décomposition peuvent être rencontrés sur des parties mortes d'un végétal sans pour autant qu'il soit complètement mort. De plus, certaines parties d'un arbre, tel le bois de cœur, sont constituées de tissus « morts » alors que l'arbre dans son ensemble est vivant. Le carottage, souvent utilisé pour dater la mort d'un végétal, risquerait donc d'être trop invasif et d'ajouter un biais pour les prochaines observations (Wunder *et al.*, 2007). Comme cela sera présenté dans le paragraphe suivant, les arbres générant des risques sur ouvrages hydrauliques sont nombreux et implantés ponctuellement. Le prélèvement d'échantillons et le développement de tests en laboratoire pour valider leur mort sont des méthodes invasives et relativement complexes à mettre en place. Par ailleurs, l'utilisation de relevés satellites peut comporter des biais à cause de pathogènes ou selon la saison par exemple (Komura *et al.*, 2005). Il sera donc plus adéquat de choisir une méthode visuelle avec des observations réalisées durant la saison de végétation, directement sur le terrain et sans avoir à réaliser d'échantillonnages invasifs (destruction des revêtements étanches pour accéder aux racines). Le modèle des zones de l'arbre proposé par W. Moore (Moore, 1997, 2003), qui consiste à étudier l'arbre en le divisant en sept zones (Figure I. 13), permet d'étudier chaque zone individuellement et ainsi mieux comprendre l'arbre dans son ensemble. On y distingue les zones II et III ayant des rôles de support encore présents après la mort de l'arbre. Et d'autres zones dont les principaux rôles sont entre-autres l'apport, la production et le stockage de nutriments et d'eau (Zones I, VI et VII). Ces zones sont vitales pour l'arbre et permettent par exemple à certains tissus de pouvoir se régénérer et à d'autres d'assurer leur croissance. Les zones VI et VII étant non accessibles, une inspection visuelle en période de feuillaison de la zone I (feuillage), à l'aide d'une classification de l'état de santé adéquate (cf. 2.2.3., Partie I) peut déjà donner une indication sur la vitalité de la plante. Mais le simple fait d'observer la défoliation d'un arbre ne veut pas systématiquement dire que le végétal est mort (Dobbertin and Brang, 2001). En effet, un mécanisme de compartimentation peut avoir lieu afin de limiter la propagation d'une blessure ou d'une maladie (Shigo, 1984). Il serait alors plus précis de prendre divers critères simultanément (Bigler and Bugmann, 2004). L'observation supplémentaire du développement des bourgeons ainsi qu'une légère coupe des tissus constituant l'écorce au niveau du collet peuvent également renseigner sur la vitalité de l'arbre (Anderegg *et al.*, 2012). Si des tissus plus ou moins verts et des bourgeons vivants sont observés, l'arbre n'est pas mort. Dans le cas contraire l'arbre est probablement mort mais il sera nécessaire de poursuivre les observations durant la saison de végétation suivante afin de confirmer la mort en fonction du végétal étudié avec la présence ou l'absence de rejets et drageons. Une reprise de vitalité peut en effet survenir après que les individus aient été notés morts lors d'un précédent relevé comme c'est le cas de noisetiers observés morts en année N + 1 puis vivants en année N + 2 (Demolis and Gama, 1990).

Compte tenu des connaissances énoncées plus haut à ce sujet, une juste définition de la mort d'un arbre doit à la fois être explicite en précisant en particulier l'échelle de l'étude, mais également donner plusieurs critères afin de constater la mort du végétal. Pour cette étude, en s'appuyant sur les définitions vues précédemment, un arbre sera considéré mort d'après la définition suivante :

A l'échelle de l'arbre, l'absence de développement de feuilles, de bourgeons et de rejets durant la saison végétative (variable selon l'espèce ligneuse ciblée) suggèrent que l'arbre est bien mort.

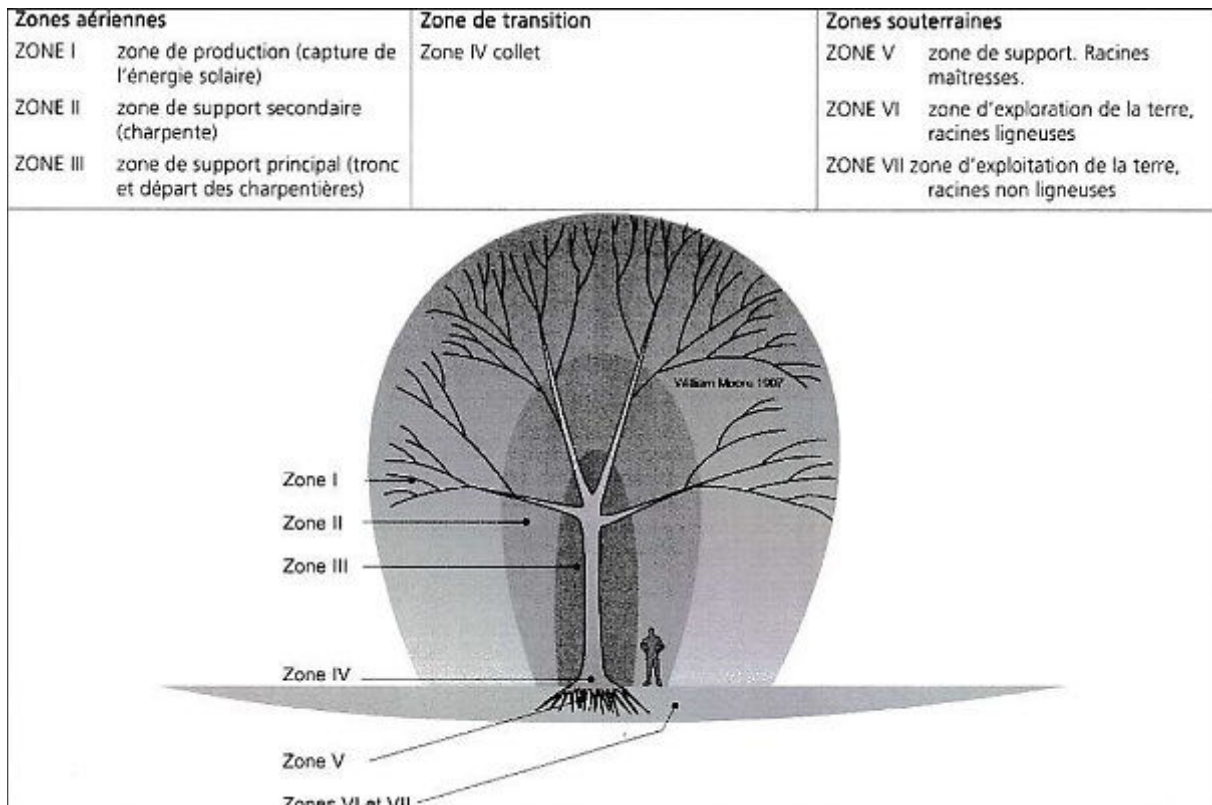


Figure I. 13 : Modèle des zones de l'arbre (Moore, 1997). Dans ce modèle l'arbre est divisé en sept zones : Les zones aériennes de l'arbre peuvent se décomposer en 3 zones suivant le développement ; La zone 4 est la zone de transition entre les parties aérienne et souterraine (le collet) ; Les zones 5 à 7 sont les parties souterraines.

3. La dévitalisation des essences ligneuses

Lorsqu'un feuillu est implanté dans un milieu favorable (ressources disponibles), il est difficile de parvenir à le dévitaliser d'autant plus que sa capacité à se multiplier végétativement rend la tâche d'autant plus complexe. En plus de cela, les essences ligneuses ont développé de nombreuses méthodes de protection et de réparation face aux diverses attaques qu'elles ont pu subir (Goodman and Novacky, 1994). Parmi elles se trouve par exemple le phénomène d'anastomose où un système racinaire en aide un autre à l'issue d'une greffe naturelle (Danjon and Fourcaud, 2009). Déjà abordé plus haut, les arbres ont également la capacité de compartimenter une zone afin de limiter la propagation d'une maladie ou les dégâts occasionnés par une blessure (Moore, 1997; Vilagrosa *et al.*, 2012) tout comme de cicatriser leurs tissus vivants de diverses façons (Maurice, 1959; Shigo and Dudzik, 1985). Mise à part la dévitalisation des ligneux à l'aide de produits phytopharmaceutiques de type dévitalisant, aucune autre méthode brevetée ou validée scientifiquement n'existe à ce jour pour provoquer la mort complète d'un arbre. En effet, des tests de dévitalisation des ligneux sont le plus souvent réalisés par des particuliers et des gestionnaires à titre expérimental et de manière ponctuelle mais les protocoles, très variables, sont rarement communiqués ou détaillés (Gama and Dumas, 1995) et les résultats sont peu probants. De même, il est rare que des suivis soient établis de manière rigoureuse. Après avoir énuméré les contraintes que ce contexte particulier implique ; des méthodes, plus ou moins abouties et efficaces, qui pourraient permettre la dévitalisation des ligneux seront identifiées. Cependant, seules les méthodes en accord avec les contraintes qui auront été mises en évidence feront l'objet d'essais afin de pouvoir être réalisables sur site *in fine*.

3.1. Des contraintes à ne pas négliger lors du choix des méthodes

La mise au point d'une nouvelle méthode de gestion des végétaux doit s'inscrire dans un processus sociotechnique et ne doit pas se limiter à la mise au point d'une méthode de gestion (Menozzi and Dutartre, 2007). En effet, de nombreuses contraintes ont été identifiées et seront à prendre en compte durant cette étude (Macia *et al.*, 2016a). Ces contraintes, notamment liées aux contextes des ouvrages hydrauliques, à la réglementation et aux arbres à dévitaliser, sont les suivantes :

- **La réglementation stricte aux abords des cours d'eau :** Comme énoncée précédemment, l'utilisation de produits phytopharmaceutiques est proscrite à proximité immédiate des cours d'eau. En effet, une ZNT de 5 mètres de large (depuis la bordure du cours d'eau) et pouvant s'étendre jusqu'à 100 mètres en fonction du produit utilisé est à respecter. De plus, dans le cadre du Développement Durable et afin de suivre les directives européennes, de nouvelles lois et le Plan Ecophyto notamment visent à réduire fortement l'utilisation de ces produits. De nombreux gestionnaires se sont déjà engagés à restreindre l'utilisation de produits phytopharmaceutiques.
- **Caractéristiques variables des ouvrages hydrauliques et des matériaux de construction :** La conception d'un ouvrage hydraulique dépend de nombreux éléments comme la charge hydraulique qu'il devra supporter et ses fonctions. Il existe une grande variabilité dans les matériaux de construction utilisés et la structure des ouvrages hydrauliques. Certains ouvrages sont en partie maçonnés (bitume, dalle de béton, perré ...) et les dégradations occasionnées par la végétation induisent des risques pouvant être très importants allant jusqu'à la perte des fonctions d'étanchéité. La gravité des désordres induits par les arbres peut donc varier selon le type et la structure de l'ouvrage. Afin de supprimer les arbres avant que les dégâts ne soient trop importants, la méthode de dévitalisation choisie devra être adaptée aux matériaux de construction qui auront des résistances thermodynamiques variables. Par exemple, un contact direct avec des températures trop élevées ou inversement pourrait induire un vieillissement prématuré des matériaux, ou des dégâts impactant la sûreté de l'ouvrage (Arioz, 2007).
- **Accès réglementés et mesures de sécurité sur ouvrages :** L'accès aux ouvrages peut représenter une contrainte car les gestionnaires limitent souvent leur accès pour des raisons de sécurité. Une visite sur site ainsi que toutes autres interventions sur ouvrage nécessitent de prendre diverses mesures bien en amont des opérations. Selon le gestionnaire, pour la réalisation d'une telle opération, un Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) doit être rédigé puis à la suite d'une visite de terrain, un Plan De Prévention (PDP) doit être élaboré et validé par le gestionnaire. En effet, le matériel utilisé sur site est réglementé comme l'utilisation d'équipements électriques ou thermiques par exemple.

Après la validation des précédentes mesures, il convient de se procurer l'autorisation de travail, tenir informé le gestionnaire de l'heure d'arrivée et de départ ainsi que veiller au port d'un Equipement de Protection Individuel (EPI) adapté aux risques rencontrés (casques, gilet de sauvetage, harnais antichute, etc.). Sur les canaux hydroélectriques les phénomènes d'intumescences (retour de vagues depuis l'usine en arrêt atteignant parfois plus de 2 m) peuvent survenir inopinément et avoir de graves incidences sur le personnel présent sur les parements. Sur les ouvrages de protection contre les inondations, la vigilance doit être portée sur le risque de crue ou submersion rapide comme dans le cas des lâchés de barrage. Afin de prévenir tout incident, la présence d'une personne supplémentaire surveillant ces

phénomènes et pouvant avertir le personnel est impérative et obligatoire. Il arrive également que certains arbres se soient implantés dans des endroits difficiles d'accès tels les bajoyers où, pour accéder à pied, il convient au personnel de s'encorder et de s'attacher à un point de fixation validé par le gestionnaire ; tout matériel doit également être attaché à la personne ou au point de fixation. En ce qui concerne l'accès à un véhicule ou un engin mécanique, il arrive que la digue ne soit pas suffisamment large ou adaptée (absence de sortie et impossibilité de faire un demi-tour), un repérage des lieux est ainsi nécessaire avant toute intervention.

Une fois l'opération de dévitalisation effectuée, la réalisation d'un suivi n'est pas aussi aisée qu'un suivi en laboratoire, diverses démarches telles qu'une demande d'autorisation d'accès aux sites, retrait puis restitution des documents, clés et cadenas sont encore à prévoir d'où la nécessité d'élaborer un planning prévisionnel complet et de faire procéder à la validation par le gestionnaire en amont des travaux sur site.

- **Contraintes liées aux conditions météorologiques :** La méthode de dévitalisation doit également être choisie en prenant en compte les conditions météorologiques des sites. En effet, la plupart des ouvrages hydrauliques de types digues de canaux et digues de protection étudiés se situent principalement dans la vallée du Rhône (CEPRIS, 2011) où le mistral, vent relativement violent, est très fréquent. En période de sécheresse, il ne faut pas négliger le risque incendie dans le choix de la méthode. De même en ce qui concerne l'usage d'éléments susceptibles de s'envoler ou relativement fragiles comme par exemple l'utilisation de matériel vivant de type fongique ou insecte, ainsi que le matériel inorganique de type verrerie. De plus, la restriction au public des sites n'étant pas toujours respectée, il est souvent interdit par le gestionnaire de laisser du matériel sur place pour des raisons de sécurité.
- **Variabilité architecturale des arbres :** Que ce soit au niveau interspécifique ou intraspécifique, l'architecture de l'arbre (diamètre et linéarité du tronc, brin principal ou cépée, etc.) va changer selon plusieurs critères : la disponibilité des ressources, la concurrence et le type de substrat. De plus, les dégâts causés par les engins mécaniques ou la faune, comme les castors qui écorcent les troncs, contraignent les arbres à développer de nombreux rejets et de nouvelles ramifications. Les nombreuses cicatrices endurcissent le bois et l'écorce. Le matériel utilisé doit donc être adaptable à toutes ces situations.

Les contraintes déjà plus ou moins identifiées viennent d'être décrites ici mais il est possible que de nouvelles contraintes soient observées qu'en conditions réelles d'où l'importance des essais sur sites.

3.2. Méthodes chimiques

Les méthodes dites chimiques consistent en l'utilisation de solutions composées de produits chimiques de synthèse mais avec l'évolution récente de la réglementation, l'utilisation des produits à base de substances naturelles est envisagée. De plus, les modes d'application de ces produits, pouvant agir sur leur efficacité ainsi que sur leur propagation dans le milieu, seront étudiés.

3.2.1. Les produits chimiques de synthèse et d'origine naturelle

Comme vu plus haut, l'usage « dévitalisant » est bien répertorié dans le catalogue national des usages phytopharmaceutiques mais il est souvent confondu avec les usages « herbicides ». Il faut noter que le terme sylvicide, trouvé dans la littérature, désigne aussi les produits pour lutter contre les ligneux mais

n'est pas reconnu en tant qu'usage par l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) en charge d'évaluer l'efficacité et les risques induits par les produits phytopharmaceutiques sur le territoire national. Il existe de nombreuses classifications de ces produits selon leur mode d'action, les organes végétaux ciblés ou bien leur composition chimique qui ne seront pas détaillés durant cette étude. Les produits dévitalisant les essences ligneuses sont principalement de type curatif agissant de manière systémique. L'action systémique d'un produit phytopharmaceutique consiste en son transport depuis l'organe où a lieu la mise en contact direct (tige, feuillage...) vers les organes aériens et souterrains non touchés directement lors de l'application. En 2003, le coût du développement d'un nouveau produit phytopharmaceutique a été estimé à 160 millions d'euros et le temps entre sa découverte et sa commercialisation serait de 10 ans (Leroux, 2003). Les renforcements réglementaires récents laissent penser que ces chiffres sont à présent bien au-dessus de ceux annoncés il y a plus de 10 ans. Compte tenu de ces chiffres et de l'obligation de respecter une ZNT concernant les produits phytopharmaceutiques, cette étude ne porte pas sur la recherche d'un nouveau produit de ce type. Ces produits sont néanmoins utilisés comme « témoin positif » lors des expérimentations en milieu contrôlé afin de pouvoir observer et comparer le temps d'action d'un tel produit et les symptômes qu'il entraîne.

En ce qui concerne l'utilisation des substances naturelles, les PNPP disposent de procédures allégées pour leur autorisation de mise sur le marché (voir 1.4.3. de la partie I) mais très peu ont été approuvés pour le moment et leurs usages restent très limités une fois autorisés. Toutefois, même si elles ne sont pas encore reconnues au niveau européen, l'utilisation de ces substances et la réglementation associée devraient encore évoluer dans les prochaines années.

À l'heure actuelle, les produits naturels sont déjà reconnus pour leurs bienfaits médicaux et sont largement utilisés en pharmacologie (Wyk and Wink, 2017). Ils sont également très étudiés pour leurs propriétés insecticides, fongicides et bactéricides (Cowan, 1999; Regnault-Roger *et al.*, 2008; Marchand *et al.*, 2014). Cependant, la littérature scientifique ne comporte que très peu d'articles sur l'utilisation des produits naturels pour la dévitalisation des ligneux et se penche plutôt le contrôle des herbacées (Abouziena *et al.*, 2009; Evans and Bellinder, 2009; Nice and Johnson, 2009). Les recherches ont donc aussi été élargies à la littérature grise (forums, sites de botanistes amateurs, gestionnaires d'espaces verts, etc.) où de nombreux sujets portant sur la dévitalisation des arbres proposent également l'utilisation de produits alimentaires tels que l'ail (*Allium sativum*), le sel et le lait (Crassous and Karas, 2007). Mais l'ensemble de ces recherches propose des protocoles variables tout comme les résultats. En 2008, S. Maillier et R. François ont tenté des essais de dévitalisation de souches de Saules avec ces produits (Maillier and François, 2008). Les résultats obtenus concernant l'ail et le sel ont montré jusqu'à 35% de résultats satisfaisants. La ville de Lyon a également testé la technique de dévitalisation à l'ail avec des résultats positifs sur le Peuplier mais peu concluants sur les Robiniers faux acacias (Direction des Espaces Verts, 2011). Toutefois, aucune suite n'a été donnée à ces études. Concernant l'ail, des études plus récentes l'ont utilisé pour cette fois-ci soigner les arbres grâce aux propriétés antifongiques de l'allicine, un composé organo-sulfuré contenue dans l'ail (Beal *et al.*, 2015; Bell *et al.*, 2016). D'autres essais sur les effets herbicides de solutions salées sur l'ambrosie ainsi que d'acides aminés sur l'orobanche ont également été réalisés plus récemment avec des résultats plutôt encourageant (Billon *et al.*, 2017; Fernández-Aparicio *et al.*, 2017). L'apport exogène d'acides aminés, composés organiques naturels fondamentaux dans les processus vitaux, a montré une action inhibitrice sur les enzymes ciblées par certaines substances de synthèse composant les herbicides comme le glyphosate ou l'imidazolinone (Sands and Pilgeram, 2009). L'emploi de substances naturelles sera donc envisagé durant cette étude selon différents modes d'application.

3.2.2. Les modalités d'usage

Comme cela vient d'être présenté, les produits servant à contrôler la végétation sont nombreux mais les modalités d'usage peuvent aussi varier (utilisations, dosages, période, zone d'application, etc.). Le mode d'application des produits phytopharmaceutiques le plus répandu est la pulvérisation visant le feuillage et la dispersion de produit peut dépendre des appareillages utilisés. Cependant les pertes dans l'air lors des pulvérisations en agriculture sont estimées entre 15 et 40% tandis que les pertes au sol sont estimées entre 10 et 45% (Sinfort *et al.*, 2009). Quant à la pollution des eaux, elle peut être directe par ruissèlement ou bien indirecte par infiltration dans le sol. Les applications par poudrage et badigeonnage présentent des risques similaires mais aucune étude ne quantifie les pertes. En ce qui concerne les ligneux, de nombreuses expérimentations ont été menées avec le développement des produits de type dévitalisant de souche et ont porté sur de nouveaux modes d'application et de nouveaux matériels d'application afin de limiter la contamination des milieux (Arbonnier, 1957, 1957; Arbonnier and Delabrazé, 1971; Delabrazé, 1971; Negreros-Castillo and Hall, 1994). Parmi ces innovations, l'injection est une méthode plus respectueuse de l'environnement car le produit est injecté par pression directement dans les tissus ce qui limite davantage la propagation dans le milieu. Une autre méthode similaire dépend uniquement des forces de pression négative du xylème qui force le produit à pénétrer les flux de sève (sans pression mécanique), il s'agit de l'infusion par le tronc (ou perfusion) mais ce procédé dépend des conditions d'évapotranspiration de l'arbre traité qui peut être très long selon l'espèce et la période de réalisation (Paoletti *et al.*, 2007). Réalisée à ses débuts de manière artisanale (Roach, 1939; Roach and Roberts, 1945; Shigo *et al.*, 1977a; Navarro *et al.*, 1992), la méthode de l'injection s'est principalement développée pour soigner les arbres (Bock *et al.*, 2013; Dal Maso *et al.*, 2014; VanWoerkom *et al.*, 2014; Aćimović *et al.*, 2015; Flower *et al.*, 2015), et dispose à présent de divers appareils disponibles dans le commerce (Photo I. 9 et Photo I. 10).



Photo I. 9 : Vue du système d'injection « Wedgle® Direct-Inject System » qui ne nécessite pas un perçage préalable du tronc (Photo : www.arborsystems.com)



Photo I. 10 : Vue d'un arbre avec deux seringues « ChemJet® tree injector » (Photo : www.chemjet.com).

Cette méthode d'injection connaît cependant des limites lorsqu'il s'agit de soigner les essences ligneuses. En effet, la réalisation d'un trou pour insérer l'appareil d'injection peut être à l'origine d'infections supplémentaires et les processus de cicatrisation semblent moins efficaces (Montecchio, 2013; Aćimović *et al.*, 2016). Par ailleurs, la réussite du passage des molécules dans les tissus vasculaires dépend de leur taille ainsi que de leurs propriétés chimiques telle que la viscosité, ce qui rend cette méthode pas toujours aussi efficace (VanWoerkom *et al.*, 2014).

Les méthodes basées sur l'emploi de solutions à base de produits naturels couplées à des modes d'applications plus respectueuses de l'environnement méritent d'être étudiées. Les modes d'application déjà connus et le test de nouvelles méthodes feront l'objet de cette étude dans le but d'identifier les techniques les plus concluantes. En revanche, même si limiter la propagation de produit dans le milieu fait partie des priorités de cette étude, les risques de propagations et de dégradations ne peuvent être étudiés du fait du manque de recul sur les futurs résultats obtenus durant cette thèse.

3.3. Méthodes non chimiques

Avec l'arrivée du plan ECOPHYTO, les méthodes non chimiques sont à présent privilégiées aux méthodes chimiques (même naturelles) dans la gestion de la végétation aux abords des cours d'eau. De nombreux essais, scientifiques ou non, ont donc émergé pour la gestion de la végétation mais ils sont rarement publiés ou vulgarisés (Hauray and Damien, 2014). Quelques méthodes envisageables pour dévitaliser les ligneux sont présentées ici mais il ne s'agit pas d'une liste exhaustive. Elles doivent également être compatibles avec les contraintes vues précédemment afin leur mise en place sur site si elles s'avèrent suffisamment efficaces.

3.3.1. Méthodes mécaniques

L'écorçage : aussi connu sous d'autres noms comme l'annelage, l'annélation ou le cerclage, cette technique a été pour la première fois employée en 1686 par M. Malpighi afin d'étudier le transport dans la plante des solutés organiques (West, 2013). A l'issue de cette expérience il a pu constater qu'une accumulation de matériaux était visible au niveau de l'écorce qui surmonte la zone d'annélation formant alors un bourrelet. Plus tard, les études reprenant cette expérience prouvèrent que la sève élaborée (composée de sucres) circule sous l'écorce dans les tissus constituant le phloème. C'est donc une méthode très utilisée dans le domaine de la recherche notamment pour l'étude du système vasculaire de la plante (Lev-Yadun and Aloni, 1992; Zwieniecki et al., 2004), du transport des différents éléments chez la plante (Bloemen et al., 2014) ou bien de la régénération des tissus végétaux (Chen et al., 2014). Cette méthode est également utilisée en agriculture pour augmenter la production et la taille des fruits ainsi que pour récolter la sève (Williams and Ayars, 2005; Choi et al., 2010). Ces recherches ont aussi mis en évidence que lorsque la sève ne parvient plus aux organes de stockage, la plante s'affaiblit et peut mourir (Noel, 1970). Cette méthode intéresse donc quelques scientifiques pour la dévitalisation des ligneux (Baldwin, 1934; De la Fouchardière, 1967; Merceron et al., 2016). Toutefois, les protocoles sont très variables d'une étude à une autre (Noel, 1970) selon la profondeur de l'entaille, les outils utilisés, la taille de la zone annelée ou la saison par exemple (Noel, 1970; Negreros-Castillo and Hall, 1994; Mataa et al., 1998; Kilroy and Windell, 1999; Choi et al., 2010). En général, l'annélation consiste à retirer l'écorce, le phloème ainsi que le cambium d'une plante ligneuse de manière à laisser le xylème à l'air libre mais il arrive que certains tissus ne soient pas retirés comme le montre la Figure I. 14 où le cambium n'a pas été retiré.

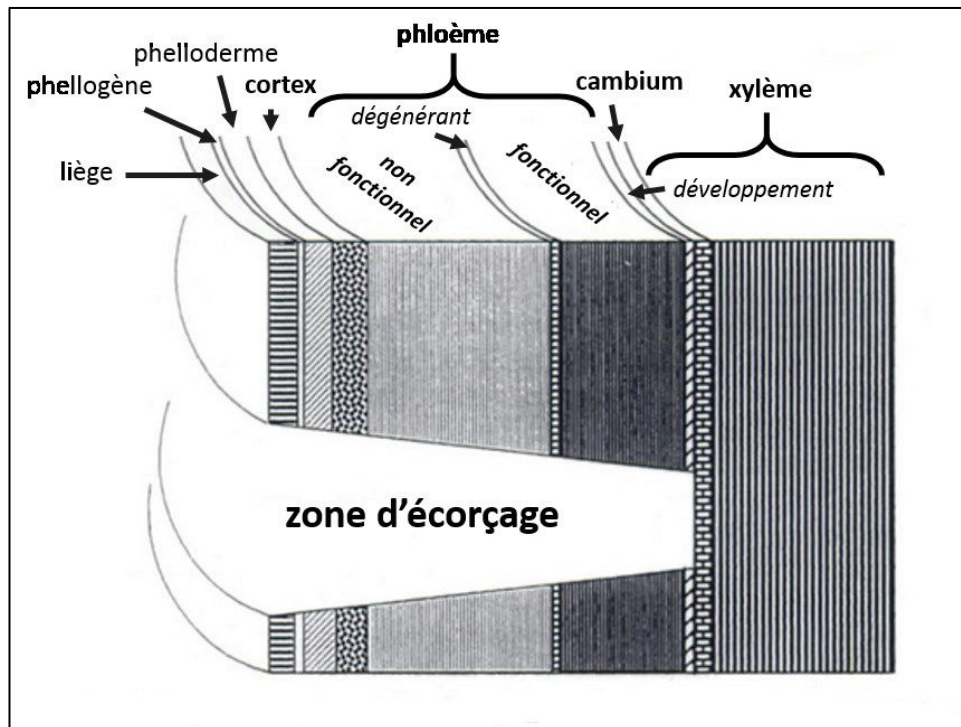


Figure I. 14 : Schéma illustrant les différents tissus ligneux à écorcer et à conserver durant l'opération d'écorçage réalisée par Noel (d'après (Noel, 1970)).

D'après un rapport portant sur la gestion des invasives publié en juillet 2016 (Concept.Cours.d'EAU SCOP and TERE0, 2016), l'annélation totale ou partielle donne des résultats concluants sur certaines espèces invasives telles que l'Erable negundo, l'Ailante et le Robinier mais ces résultats sont encore variables et relativement longs à obtenir (Tableau I. 9). En effet, la saison, l'espèce et l'âge de l'arbre peuvent aussi influencer l'efficacité de la méthode (Zhengli and Keming, 1988; Hughes *et al.*, 2001; Regier *et al.*, 2010). Il est à noter également que l'annélation d'un arbre peut entraîner, tout comme pour l'abattage, la pousse de nombreux rejets et drageons, rendant cette méthode inefficace et aggravant parfois même le risque de colonisation de l'espèce (Noel, 1970; Hauteclair, 2009; Merceron *et al.*, 2016). De plus, il arrive que des ponts de cicatrisation se créent permettant de nouveau la circulation de la sève élaborée et la survie de l'arbre (De la Fouchardière, 1969; Zhengli and Keming, 1988; Chen *et al.*, 2014). De la même manière, lorsque la zone n'est pas complètement écorcée et que des tissus du cambium sont encore présents, les angiospermes disposent de nombreuses stratégies de cicatrisation ou régénération.

Ainsi, même si de plus en plus de gestionnaires préconisent l'écorçage pour la gestion d'espèces invasives au travers de fiches d'action (P Ashe, 2007; Hauteclair, 2009; Halford *et al.*, 2014), cette méthode n'est pas encore complètement aboutie et l'efficacité de cette technique reste donc discutée.

Tableau I. 9 : Présentation de quelques tests d'écorçage réalisés dans le but de dévitaliser des essences ligneuses. *Selon la référence, les protocoles cités ne sont pas plus détaillés.

Essences ligneuses ciblés	Protocole d'écorçage*	Résultats	Référence
Erable negundo (adulte)	Ecorçage total à 1,30m au-dessus du sol à l'aide d'une hache, retrait de l'écorce, du phloème et du cambium sur une bande de 30 cm. (Mai/Juin)	Après 1 ans : pas d'effet significatif du traitement sur la mortalité Après 2 ans : 65% de mortalité Après 3 ans : 75% de mortalité	(Merceron <i>et al.</i> , 2016)
Bouleau jaune Hêtre Erable à sucre	- « <i>notching</i> » : Ecorçage total à 1,30m au-dessus du sol en réalisant des entailles dans le phloème et pouvant atteindre le xylème (Février/Mars) - « <i>Peeling</i> » : Ecorçage total à 1,30m au-dessus du sol en retirant uniquement l'écorce sur une large bande (Février/Mars)	Après la première saison de croissance : développement de moisissures au niveau des zones écorcées puis assèchement de ces zones. Sortie de rejets et Coloration automnale des feuilles observée en avance sur la saison Après la seconde saison de croissance, majorité des arbres faibles et quelques arbres morts (pas de chiffre) Pas de différences entre les deux traitements	(Baldwin, 1934)
Bouleau pubescent (arbre de plus de 7cm de diamètre)	Elimination de l'écorce, du phloème et du cambium à la tronçonneuse sur 30 cm de long (juillet) Puis coupe des rejets l'année suivante	99% de réussite après 2 à 3 ans mais second passage obligatoire pour couper les rejets / moins concluant sur plus petits arbres	(Gay T. <i>et al.</i> , 2010)
Ailante	Annélation partielle (10% d'écorce laissée) sur 40cm de haut depuis la base (début de l'été) puis retrait de la bande laissée à l'automne	100% de réussite sur les Ailantes l'année suivante	Réalisé par le syndicat mixte du bassin de la Sorgues (d'après (Concept.Cours.d'EAU SCOP and TERE0, 2016)
Ailante Erable négundo Robinier	Ecorçage total sur 20-30 cm de haut à une hauteur de 1 à 1,3m au-dessus du sol	Apparition de rejets et drageons pour les Robiniers et Ailantes mais mortalité complète des érables negundo après 2 à 4 ans.	Réalisé par le groupe de travail Invasions Biologiques en Milieux Aquatiques (d'après (Concept.Cours.d'EAU SCOP and TERE0, 2016)
Olivier de bohème	Ecorçage sur 20cm à 1,5m au-dessus du sol puis autre méthode d'écorçage réalisée à la tronçonneuse sur 3 cm de profondeur au ras du sol	Apparition de rejets et drageons suite aux deux méthodes	Réalisé par l'association ADENA (d'après (Concept.Cours.d'EAU SCOP and TERE0, 2016)

Bâchage : Cette méthode consiste à recouvrir les végétaux à l'aide d'une bâche opaque afin d'empêcher le processus de photosynthèse vital aux essences ligneuses et induire leur mort. Il ne faut pas la confondre avec la technique de solarisation des sols principalement utilisée en agriculture. En effet, cette dernière utilise préférentiellement une bâche placée au sol laissant passer les rayons lumineux et servant à protéger les sols des différemment phytopathogènes et autres organismes présents par le réchauffement superficiel des sols (Stapleton and Devay, 1982; Martin and Thicoïpe, 1994; Prieur and C.R.E.A.B, 2010; Reddy, 2012). D'autres études utilisant la méthode du bâchage des arbres sont également orientées pour soigner les végétaux ou les protéger des aléas climatiques (Van Leeuwen et al., 1998). Encore une fois, peu de recherches scientifiques portent sur la méthode du bâchage pour contrôler le développement des végétaux. Cette méthode est pourtant déjà mise en place par quelques gestionnaires ou des particuliers (Concept.Cours.d'EAU SCOP and TERE0, 2016). Tout comme pour l'écorçage, les protocoles sont variables (matériaux constituant la bâche, épaisseur de la bâche, temps de mise en place, etc.) et les suivis ne sont pas systématiques. Une expérience menée sur des Charmes et des Chênes avait montré que le bâchage d'une souche fraîchement coupée diminuait considérablement la pousse de rejets lors de la première année. La deuxième année, certains Charmes n'avaient toujours pas développé de rejets et d'autres en avaient développé de très petits et décolorés, en revanche les Chênes avaient développé des rejets vigoureux ainsi que des drageons (Roussel, 1978). La privation de lumière semble bien retarder le développement des bourgeons adventifs et proventifs mais la moindre luminosité suffit pour que leur développement ne reprenne. De plus, les résultats de cette étude n'ayant que deux ans de recul restent provisoires et peuvent évoluer dans le temps. Une étude plus récente sur la dévitalisation des Saules avait montré 72% de résultats satisfaisants en couvrant les souches par deux épaisseurs de bâche plastique noire (Maillier and François, 2008). Des rejets avaient toutefois été observés l'année suivant le traitement sur 15% des sujets traités. D'autres observations de gestionnaires portant sur la mise en place de bâches pour contrôler le développement de la végétation ligneuse ont montré des résultats variables selon l'épaisseur et les matériaux composant la bâche, une dégradation trop rapide de cette dernière est souvent observée.

3.3.2. Méthodes thermiques

Abaissement des températures : Le gel est à l'origine de nombreux problèmes pour les végétaux (voir 2.3.3., Partie I). Le passage de l'état liquide à l'état semi-cristallin de la membrane des cellules végétales à des basses températures est similaire aux effets d'un stress hydrique (Hopkins, 2003). Par exemple, lorsque les tissus conducteurs du xylème sont gelés, l'absorption de l'eau par les racines est stoppée, et comme l'évaporation de l'eau se poursuit, un dessèchement de la plante est observé (Charrier and Améglio, 2011; Charrier et al., 2014). De plus, la formation de cristaux de glace dans les tissus du xylème peut être à l'origine d'une embolie hivernale déjà abordée précédemment. Pourtant, certains arbres peuvent résister à des températures allant jusqu'à -196°C en hiver et mourir par -3°C en période de croissance au printemps (Burke et al., 1976; Hopkins, 2003). En effet, durant l'hiver les arbres entrent en dormance et s'endurcissent afin de s'acclimater aux basses températures. Divers mécanismes sont alors mis en place afin de résister aux changements de températures et il arrive qu'une plante meure avec seulement quelques degrés de différence si l'acclimatation n'a pas encore eu lieu (Charrier et al., 2015; Taiz et al., 2015). Ce phénomène est souvent observable en automne durant la première chute des températures alors que les arbres ne sont pas encore en Phase de dormance ou au printemps avec une rechute des températures alors qu'ils en sont sortis. Le gel des arbres ou du moins d'une partie de l'arbre apparaît comme une méthode de dévitalisation pouvant être concluante mais elle n'a pas encore fait l'objet d'études scientifiques.

Élévation des températures : Les arbres sont également sensibles à l'élévation des températures comme lors d'épisodes de canicule ou d'incendie, et tout comme pour l'effet de l'abaissement des températures, les dommages occasionnés seront variables selon la résistance de l'espèce et le temps d'exposition. En sachant que la température létale des cellules végétales avoisine les 70°C lors d'une exposition de quelques secondes (60°C pour des cellules cambiales ; (Dickinson and Johnson, 2004), plus un tissu ou un organe végétal sera fin et plus les flux de chaleurs seront importants (Pimont et al., 2012). L'écorce, plus ou moins épaisse selon l'espèce, procure une première protection des tissus de conduction vitaux à la plante (Brando et al., 2012). Le houppier en revanche ne sera pas épargné et les dégâts occasionnés (destruction du feuillage et des bourgeons dormants) s'avèrent parfois mortels. En ce qui concerne les racines, le sol fait office d'isolant naturel et seuls les systèmes racinaires traçants superficiels seront impactés. La méthode du brûlage a tout de même été expérimentée pour la dévitalisation des Saules déjà abordée précédemment ; elle a consisté à brûler au chalumeau le cœur de la souche (Maillier and François, 2008). Cette méthode a montré de bons résultats (66%) bien qu'elle soit moins efficace que le bâchage mis en place durant la même étude, et la pousse de rejets a également été observé après 1 an. Une autre méthode plus invasive consiste à utiliser le feu de manière contrôlée, il s'agit du brûlage dirigé (parfois confondu avec le brûlage pastoral ou l'écobuage), une méthode ancienne surtout utilisée en sylviculture qui permet de limiter la propagation des feux de forêt en réduisant le taux de combustible. Plutôt utilisé pour des opérations de débroussaillage, scientifiques et gestionnaires se sont interrogés sur l'utilisation du brûlage dirigé pour limiter la colonisation des milieux par les essences ligneuses (Swezy and Agee, 1991; Binggeli, 1997a, 1997b; Gignoux et al., 1997; Ascoli et al., 2013). Même si cette méthode donne des bons résultats sur de jeunes ligneux, elle connaît cependant des limites comme le risque de propagation des essences par reproduction sexuée concernant les espèces pyrophytes et le risque d'apparition de nombreux rejets issus des arbres adultes pas totalement dévitalisés (Wang, 2003). Elle nécessite également des conditions météorologiques particulières avec des vents entre 20 et 40km/h au maximum, des températures relativement basses et un fort taux d'humidité, nécessaires pour la maîtrise du feu. Ces conditions favorables ont été évaluées à une quinzaine de jours par an sur la région méditerranéenne (Pimont et al., 2012). De plus, cette étude porte sur des essences implantées ponctuellement et généralement éloignées les unes des autres, le brûlage dirigé semble donc peu adapté à ce contexte d'étude, d'autant plus que sous les revêtements bétonnés ou bitumineux, les systèmes racinaires ne seraient pas affectés. Au-delà de cet aspect, les fortes températures risqueraient d'endommager les bajoyers (fonte du bitume et fissuration du béton). De plus, les végétaux ont aussi développé des stratégies adaptatives face aux feux (Gignoux et al., 1997; Pimont et al., 2012):

- Les espèces « pionnières pyrophytes » : La mort, occasionnée par le feu, entraîne une forte reproduction sexuée et une grande propagation, stratégie surtout connue chez les gymnospermes comme le Pin d'Alep.
- Les espèces « résistantes » : il s'agit d'espèces plus résistantes grâce à l'épaisseur de leur écorce tel que le Chêne liège.
- Les espèces « endurentes » : Ces essences sont capables de survivre au feu avec une forte capacité à émettre des rejets de souche tel que le Chêne kermès.

Une autre méthode utilisant la chaleur, la thérapie, a fait l'objet d'études dans le cadre du management des maladies des plantes cultivées (Papstein *et al.*, 2008; Fan *et al.*, 2016). Cette méthode consiste à élever la température des tissus ligneux aux alentours de 50°C au maximum soit par aspersion d'eau chaude soit à l'aide d'une chambre climatique. Elle est également utilisée pour l'étude de la levée de dormance ou des mécanismes de germinations mais aucun article ne mentionne

son utilisation pour éradiquer les arbres. Depuis peu, le développement d'appareils permettant l'application d'eau chaude, d'air chaud ou même de mousse chaude utilisés pour le désherbage est en plein essor et permet d'éviter l'utilisation de produits chimiques, mais ces méthodes ne sont pas suffisamment efficaces pour dévitaliser les arbres (Prieur and C.R.E.A.B, 2010; Decoin, 2014).

3.3.3. Méthodes biologiques

Incompatibilité de greffage : Le greffage est une méthode horticole qui consiste à associer deux individus du même génotype (autogreffe), de la même espèce (homogreffe) ou bien de deux espèces différentes (hétérogreffe) en formant un couple porte-greffe/greffon telles une soudure entre deux plantes ou parties de plantes (Scheidecker, 1961). Cette méthode est principalement employée sur les arbres fruitiers car elle génère de nouvelles qualités agronomiques (meilleures résistances aux pathogènes par exemple) et améliore les caractéristiques des plantes (qualité des fruits, vigueur, etc.) (Verger, 2000). Il s'agit cependant d'une méthode complexe nécessitant un savoir-faire allié à un bon état physiologique du couple porte-greffe/greffon et de bonnes conditions de réalisation comme par exemple la saison (Michelot, 2010). Malgré ces conditions réunies, la compatibilité porte-greffe/greffon est parfois impossible, on parle alors d'incompatibilité de greffage (Michelot, 2010). Cette incompatibilité peut être d'origine virale, génétique ou biochimique et entraîne la mort du greffon ou du porte-greffe ou des deux. Cette méthode pourrait alors permettre de dévitaliser de manière naturelle une essence ligneuse non désirée. Cependant les incompatibilités de greffage peuvent se manifester dans les jours suivant le greffage comme plusieurs années plus tard et les mécanismes à l'origine d'incompatibilité de greffage sont encore loin d'être maîtrisés (Scheidecker, 1961; Pina and Errea, 2005). D'après l'étude bibliographique effectuée, aucune recherche n'a porté jusqu'à présent sur l'incompatibilité de greffage réalisée dans le but de dévitaliser le porte-greffe.

Eco-pâturage : Il s'agit de placer un troupeau de bêtes (chèvres, moutons, etc.) pour tondre naturellement une zone végétalisée. Cette méthode a été expérimentée par ARBEAUSolutions, au cours de ces trois années de thèse, pour contrôler le développement de la végétation le long de ligne ferroviaire ainsi que d'ouvrages hydrauliques (Photo I. 11 et Photo I. 12) (Macia et al., 2016b; Unternehr, 2016; SNCF Réseau, 2017). Mais l'éco-pâturage n'impacte pas de la même manière tous les types de végétation (strates herbacée, arbustive, arborescente) et reste peu efficace en ce qui concerne la strate arborée adulte ou lorsque les milieux sont trop fermés. De plus, cette méthode nécessite une surveillance supplémentaire et la mise en place de nombreuses mesures de sécurité du site parfois non compatible avec ces méthodes.



Photo I. 11 : Expérimentations d'éco-pâturage menées par ARBEAUSOLutions le long d'une digue de canal lors (photo : Macia J., 2016).



Photo I. 12 : Vue d'une partie de la digue après le passage du cheptel, les herbacées, les ronces et les branches basses des arbres ont été pâturées. La partie basse des arbres parfois écorcée (photo : Macia J., 2016).

Lutte biologique : Après avoir été mises à l'écart au profit du développement des produits phytopharmaceutiques, les méthodes de lutte biologique font leur retour depuis quelques années dans un but de protection de l'environnement et de développement durable (Culliney, 2005; Huffaker, 2012; DiTomaso et al., 2017). Les définitions sont nombreuses mais s'accordent sur le fait qu'il s'agit d'une méthode de contrôle où des produits d'origine naturelle ainsi que des organismes vivants prédateurs, pathogènes ou simplement herbivores sont utilisés contre d'autres organismes indésirables (ravageurs, mauvaises herbes...). Il faut noter que la lutte biologique est considérée comme un outil de protection des végétaux, elle ne vise pas à éradiquer les organismes nuisibles et les espèces invasives mais consiste à gérer de manière équilibrée les populations de bioagresseurs, c'est-à-dire à faire en sorte de diminuer leur nombre afin que leur présence soit tolérable. Les méthodes non chimiques ne sont donc pas toutes des méthodes de lutte biologique (Boivin, 2001). On distingue 4 types d'agents de biocontrôle :

- Les macro-organismes auxiliaires (invertébrés, insectes, acariens et nématodes)
- Les micro-organismes (bactéries, virus, champignons)
- Les médiateurs chimiques (phéromones naturels...)
- Les substances naturelles (substances d'origine végétale, animale ou minérale)

Les macro-organismes autorisés en lutte biologique doivent être inscrits, après examen par l'Anses, sur la liste des macro-organismes pouvant être lâchés sur le sol français publiée dans l'arrêté du 26 février 2015 (NOR: AGRG1502673A). Les trois autres types d'agents, aussi nommés produits de biocontrôle, sont considérés comme des produits phytopharmaceutiques et sont encadrés par le règlement (CE) n° 1107/2009 du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques. Les essences ligneuses ciblées lors de cette étude ne sont pas à éradiquer partout mais seulement où elles sont nuisibles pour les ouvrages hydrauliques, il semble donc difficile de mettre en place une telle méthode. De plus, comme précisé précédemment, une zone non traitée d'un minimum de 5 mètres est toujours obligatoire en ce qui concerne les produits de biocontrôle. Ces techniques alternatives, bien qu'en plein essor dans le secteur agricole, ne sont pas encore toutes maîtrisées et ne sont pas toujours adaptées aux zones non agricoles en raison de leur plus petite surface, parfois difficile d'accès, et de leurs proximités aux zones

sensibles (points d'eau, parcs infrastructures publiques, etc.). L'introduction de tels micro ou macro-organismes nécessite plusieurs années d'études afin de mettre au point des méthodes adaptées aux zones non agricoles et d'éviter que l'organisme introduit ne devienne à son tour nuisible (Stiling and Cornelissen, 2005; Perez *et al.*, 2010). D'après une review publiée en 2003 sur la lutte biologique, 18 cas d'introduction de parasitoïdes ont eu un impact négatif significatif sur des organismes non ciblés, et 15 cas d'introduction d'insectes sur 112 ont eu un impact négatif sur des espèces non ciblées également lors du contrôle d'espèces herbacées envahissantes (Louda *et al.*, 2003).

4. Bilan

Cette Partie I a permis de mieux appréhender le contexte particulier des ouvrages hydrauliques et les enjeux à la fois sécuritaires, environnementaux et paysagers qui les caractérisent aujourd'hui. Une réglementation concernant la gestion des essences ligneuses implantée sur les ouvrages hydrauliques a été mise en évidence et apparaît peu explicite malgré la connaissance des risques que cette végétation peut occasionner ou aggraver. Suite aux nombreuses restrictions règlementaires concernant l'utilisation des produits phytopharmaceutiques, et leur interdiction formelle près des cours d'eau, les gestionnaires ont peu de solutions de gestion aujourd'hui d'où la nécessité de mettre au point de nouvelles méthodes de dévitalisation des essences ligneuses. Un bilan sur l'état des connaissances actuelles autour des essences ligneuses a alors permis d'identifier les méthodes qui pourraient permettre de dévitaliser ces dernières. Toutefois, certaines de ces méthodes n'ont jamais été étudiées dans ce but et aucune des méthodes identifiées n'a été expérimentée dans ce contexte particulier. C'est pourquoi les essais qui font l'objet de cette étude doivent se centrer sur les méthodes les plus envisageables sur site, compatibles avec les différentes contraintes identifiées, et si possible à moindre coût. Le Tableau I. 10 récapitule les méthodes de dévitalisation identifiées précédemment qui seraient compatibles avec les contraintes liées au contexte des ouvrages hydrauliques et la réglementation en vigueur.

Tableau I. 10 : Récapitulatif des méthodes de dévitalisation identifiées et estimation de leurs compatibilités avec la réglementation stricte aux abords des cours d'eau ainsi qu'avec les contraintes liées au contexte particulier des ouvrages hydrauliques. Pas compatible : - ; moyennement compatible : +/- ; très compatible : + .

Types d'action	Méthode	Réglementation stricte aux abords des cours d'eau	Contraintes liées au contexte des ouvrages hydrauliques (matériaux, accès, météo, etc.)
Chimiques	Produits naturels	?	+
Mécaniques	Ecorçage	+	+
	Bâchage	+	+/-
Thermiques	Abaissement des températures	+	+
	Élévation des température	+	+/-
Biologiques	Incompatibilité de greffage	+	+/-
	Eco-pâturage	+	+/-
	Lutte biologique	+/-	+/-

D'après l'analyse bibliographique présentée précédemment, le bâchage, l'élévation des températures et les méthodes biologiques ne paraissent que moyennement compatibles avec les contraintes liées au contexte des ouvrages hydrauliques :

- L'utilisation de bâche est en effet peu compatible avec les conditions météorologiques ainsi que les risques d'élévation soudaine du niveau d'eau (phénomène d'intumescence, ...) qui emporterait les bâches. Une surveillance quasi-journalière, ce qui est difficile à prévoir sur de tels sites, serait aussi à prévoir car le moindre passage de la lumière permettrait à la plante de poursuivre sa croissance.
- L'élévation des températures par la méthode du brulage dirigé par exemple s'avère également impossible à mettre en place sur des sites exposés à de forts vents tout au long de l'année où le risque incendie est déjà fortement redouté. De plus, la partie racinaire étant protégée par les revêtements bétonnés ou bitumineux, les systèmes racinaires ne seraient pas affectés et les fortes températures ne feraient qu'endommager les bajoyers.
- Les méthodes biologiques identifiées semblent également moyennement compatibles avec cette étude. La lutte biologique n'est également pas adaptée à ce contexte en sachant que les sujets ciblés sont souvent implantés ponctuellement et que seuls les sujets implantés sur les ouvrages seraient ciblés. Le risque de propagation des macro et micro-organismes par l'eau et le vent serait également difficile à gérer dans ce contexte. L'incompatibilité de greffage est une méthode minutieuse non adaptée aux conditions météorologiques de ce contexte et les résultats semblent aléatoires et longs à obtenir. L'éco-pâturage ne serait pas suffisamment efficace pour lutter contre la végétation arborescence et difficile à mettre en place sur les digues de canaux hydroélectriques de par la configuration des bajoyers et le besoin d'une surveillance journalière

En ce qui concerne les méthodes chimiques, étant donnée l'interdiction formelle d'utilisation des produits chimiques près des cours d'eau et dans un souci de préservation de l'environnement, le développement de méthodes utilisant de tels produits ne fera pas l'objet de cette étude. Cependant, avec le retour à l'utilisation de produits naturels dans divers domaines (médecine, cosmétiques, etc.) et la possibilité de limiter la propagation dans le milieu, les substances d'origine naturelle associées à des modes d'applications adaptés à la dévitalisation des ligneux seront étudiées.

Les méthodes de dévitalisation par écorçage et par abaissement des températures semblent également les plus compatibles avec les contraintes et la réglementation. Même si la méthode de l'écorçage donne des résultats variables et l'abaissement des températures n'a pas encore été mis à l'essai pour dévitaliser des essences ligneuses, l'étude bibliographique, portant notamment sur la physiologie et les mécanismes des flux de sève, font penser qu'elles seront efficaces.

Pour la suite de cette étude, ces trois méthodes (écorçage, abaissement des températures et utilisation des produits naturels) feront donc l'objet d'essais en milieu contrôlé dans un premier temps. Les premiers essais serviront à faire un premier criblage des méthodes choisies et auront pour vocation de confirmer leur efficacité. Le criblage d'un grand nombre de traitements sera privilégié sur un plus petit nombre d'échantillons. Puis en fonction des résultats observés, les traitements les plus efficaces seront reproduits sur un plus grand nombre d'échantillons. En fonction des résultats obtenus, l'optimisation et le couplage des méthodes efficaces sera aussi envisagé afin d'augmenter leur efficacité. Les essais réalisés sur site avec l'accord des gestionnaires d'ouvrages et les contraintes rencontrées face à la réalité du terrain seront également présentés dans la suite de ce manuscrit.

PARTIE II - ESSAIS EN CONDITIONS CONTROLEES

Cette Partie II est gardée confidentielle par souhait d'ARBEAUSOLutions, financeur de ce travail de doctorat réalisé dans le cadre d'une CIFRE.

PARTIE III - MISE EN ŒUVRE DE TRAITEMENTS EN CONDITIONS REELLES

Cette Partie III est gardée confidentielle par souhait d'ARBEAUSOLutions, financeur de ce travail de doctorat réalisé dans le cadre d'une CIFRE.

PARTIE IV - CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

1. Synthèse des travaux

La végétation ligneuse a fait l'objet de récentes études démontrant son implication dans les phénomènes d'érosion externe et interne affectant les ouvrages hydrauliques qui représentent de forts enjeux sécuritaires et environnementaux (Mériaux and Royet, 2007; Zanetti, 2010; Mériaux et al., 2015). Mais depuis l'obligation de respecter une zone non traitée à moins de 5 mètres des cours d'eau, les gestionnaires, qui utilisaient des produits phytopharmaceutiques pour contrôler le développement de la végétation ligneuse, se sont trouvés limités en outils et moyens de gestion. La coupe, peu onéreuse et laissant les ouvrages « propres » de façon momentanée, provoque la production massive de rejets et drageons des essences feuillues et ne permet donc pas de stopper leur croissance. Le dessouchage, obligatoire lorsque les dégâts sont déjà visibles, reste une solution de dernier recours pour les gestionnaires compte tenu des coûts non négligeables et des travaux de grande envergure qu'ils occasionnent. Ainsi, le développement d'une ou plusieurs méthodes alternatives de dévitalisation des ligneux générant des risques sur les ouvrages hydrauliques a fait l'objet de la recherche réalisée dans le cadre de cette thèse CIFRE portée par la société ARBEAUSOLutions.

L'état des connaissances actuelles sur la végétation ligneuse et l'identification de contraintes liées au contexte de cette étude ont permis d'identifier plusieurs méthodes prometteuses. Les essais et le criblage de ces méthodes ont mis en évidence, lors d'une première Phase en serre, que les symptômes occasionnés par les différents traitements sont variables sur les différentes espèces testées et ont des temps d'actions plus ou moins rapides. Une seconde Phase, en serre également, réalisée sur un plus grand nombre d'individus a mis en exergue des traitements efficaces à 100 % (avec un recul de 12 mois) sur de jeunes Robiniers faux acacia, Saules blancs, Frênes communs et Chênes pédonculés. Mais sur les jeunes Peupliers noirs et Ailantes aucun traitement n'a montré 100 % d'efficacité. Un nouveau traitement efficace à 100 % sur des Peupliers noirs plus âgés a tout de même été observé lors d'une dernière Phase en champ. Toutefois n'ayant que 6 mois de recul sur ces résultats, il faudra confirmer qu'ils restent inchangés au printemps prochain.

Par ailleurs, le contexte particulier de cette étude impliquant de nombreuses contraintes pour la mise en œuvre des méthodes *in situ*, il a donc paru primordial de les tester sur site afin de confirmer leurs faisabilités et leurs efficacités. Des expérimentations ont ainsi été menées sur des Peupliers noirs implantés sur un canal hydroélectrique en parallèle des essais *ex situ*. Aucune méthode ne s'est avérée efficace à 100 % sur site mais les résultats sont restés encourageants et ces essais *in situ* ont également permis d'être confrontés aux conditions complexes des sites (accès aux arbres, morphologie des sujets, nombreuses mesures de sécurités, planning d'exploitation du gestionnaire, etc.). Certaines de ces contraintes n'avaient pas été identifiées avant ces expérimentations et devront impérativement être prises en compte lors des prochains essais.

L'objectif final de ce travail étant de développer des solutions innovantes et un savoir-faire spécifique pour l'entreprise ARBEAUSOLutions, ces recherches ont été menées dans un cadre confidentiel où aucune communication autour des méthodes et des résultats n'était possible. La signature de contrats de confidentialité avec les divers partenaires a tout de même permis le bon déroulement des essais *ex situ* ainsi qu'*in situ* et ont mené à des échanges fructueux notamment au sein de l'INRA.

In fine, les traitements jugés efficaces *ex situ* et évalués *in situ*, ont fait l'objet d'un dépôt de brevet dont deux des cinq inventeurs font partie du personnel de l'INRA.

2. Perspectives

2.1. Perspectives scientifiques

A la suite de cette étude, de nombreuses perspectives scientifiques ont été identifiées. Le système de notation établi pour le suivi de l'état de santé des arbres a permis d'analyser l'évolution des symptômes induits par les différents traitements testés en milieu contrôlé. En revanche, la validation de l'efficacité des traitements reste encore incertaine sans méthodes invasives et les symptômes peuvent parfois être confondus avec ceux causés par d'autres facteurs biotiques ou abiotiques (pathogènes, gelées tardives, fortes chaleurs, etc.). L'efficacité d'un traitement pourrait être validée lorsque l'ensemble des arbres traités a été observé dans la dernière catégorie du système de notation employé tout au long de l'étude (Stade 6 : « Ensemble des bourgeons secs/feuilles sèches, partie aérienne de l'arbre traité morte, et absence de rejets/drageons »). Cependant, les traitements efficaces à 100 % ont été peu nombreux et même l'utilisation d'un produit chimique de type dévitalisant n'a pas toujours entraîné la dévitalisation de l'ensemble des arbres traités *ex situ* (cas de l'Ailante notamment). De plus, ce résultat n'est valable qu'au moment de l'observation et les suivis effectués jusqu'à 12 mois ont montré que l'état de santé d'un arbre pouvait encore s'améliorer ou se dégrader tout au long de cette période. Les processus menant à la dévitalisation d'un arbre peuvent ainsi se dérouler sur plusieurs mois voire plusieurs années (Demolis and Gama, 1990; Ducrey and Turrel, 1992). Des outils ou des méthodes non invasives restent donc à développer pour confirmer si un arbre est ou non condamné.

La capacité des feuillus à pouvoir se multiplier végétativement leur permet de produire des rejets ainsi que des drageons. Il semble que ce phénomène ait lieu lors d'événements mettant en péril leur survie. Mais la présence des rejets, leurs nombres et leurs tailles ont été variables selon les traitements, l'espèce, l'âge et la période d'application du traitement. L'origine de l'aptitude d'un arbre (angiospermes) à produire des rejets par rapport à d'autres (gymnospermes sauf exceptions) n'a pas encore été identifiée (Bond and Midgley, 2001). Les recherches ont majoritairement porté sur la disponibilité des réserves glucidiques pour expliquer la multiplication végétative des arbres mais la génétique, la biomasse et d'autres paramètres sont également à l'étude (Kabeya et al., 2003; Matula et al., 2015).

La localisation des réserves des ligneux dépend du rapport de masse entre la partie aérienne et la partie souterraine. Plus un arbre est âgé moins sa biomasse sera grande dans les parties souterraines mais elle sera concentrée dans les parties aériennes comme le tronc et les branches (Grulke and Retzlaff, 2001; Matula et al., 2015). Ainsi, les réserves seraient moins importantes dans les organes souterrains et majoritairement présentes dans les organes aériens chez un arbre adulte. A contrario, chez un jeune arbre, les réserves seront majoritairement stockées dans les parties souterraines. Ceci pourrait donc expliquer le fort taux d'émission de rejets et drageons lors des essais effectués sur de jeunes arbres et l'observation sera contraire sur les arbres plus âgés. Un second traitement portant uniquement sur les rejets a été testé lors des dernières Phases *ex situ* et les premières observations ont été concluantes. Ce second traitement permettrait ainsi d'épuiser définitivement les réserves des jeunes ligneux et de proposer une solution lorsque le premier traitement n'a pas été efficace à 100 %. Par ailleurs, des résultats différents ont été observés selon la période de réalisation des traitements lors des essais sur sites. Le printemps a semblé plus favorable à l'efficacité des traitements que l'automne. La localisation des réserves étant variables en fonction des saisons (Landhäuser and Lieffers, 2003; Regier et al., 2010), il serait intéressant de confirmer cette observation en conditions contrôlées. **[Texte confidentiel]**

2.2. Perspectives industrielles

De nombreuses perspectives industrielles pourront aussi être envisagées à l'issue de cette étude.

[Texte confidentiel]

Dans la pratique, l'industrialisation de telles méthodes sera-t-elle possible ? D'autres gestionnaires d'ouvrages hydrauliques et d'autres sites industriels ont manifesté un intérêt pour ces méthodes de dévitalisation des ligneux durant cet étude ; eux-mêmes concernés par les restrictions réglementaires et l'interdiction d'utiliser des produits phytopharmaceutiques à proximité des habitations et de certains lieux publics (JEVI). Toutefois, seules des solutions rapides, efficaces à 100 % et peu onéreuses suscitent leur intérêt. De plus, les essais *in situ* ont permis de constater que la mise en œuvre de ces méthodes nécessitait au préalable un repérage précis du site et des arbres ciblés, un matériel adapté aux consignes de sécurité ainsi qu'une équipe d'opérateurs formée à la réalisation des traitements et sensibilisée aux consignes de sécurité. De plus, si une seule période s'avère propice à l'efficacité des traitements, cela rajoute une contrainte supplémentaire. Ce constat avait déjà été observé pour la recherche de produits naturels en alternative à l'application de produits chimiques pour le désherbage des bords de route et des cultures où d'un point de vue économique, tout comme pour l'efficacité, les produits naturels pourront difficilement rivaliser avec les produits chimiques de type herbicide tel que le glyphosate (Young, 2004; Barker and Prostack, 2014).

Le développement de la végétation ligneuse constituera toujours un problème récurrent sur les ouvrages hydrauliques, notamment lorsqu'ils sont constitués de revêtement rigide. L'intégration de cette contrainte devrait être prise en considération dès la conception des ouvrages et lors des travaux de réparations ; ainsi la mise en place de nouveaux matériaux permettant le développement d'une végétation ligneuse sans qu'elle ne génère de risque devrait être envisagé. Le génie végétal, aujourd'hui en plein essor pour la restauration des berges de cours d'eau (Lachat et al., 1997; Evette et al., 2014; Delage et al., 2017), pourrait être allié aux techniques de génie civil et permettre ainsi de pérenniser les ouvrages hydrauliques. L'objectif serait qu'ils puissent assurer leurs fonctions tout en étant le support d'un corridor écologique ainsi les enjeux sécuritaires seraient sur le même plan que les enjeux environnementaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abouziena, H.F.H., Omar, A.A.M., Sharma, S.D., and Singh, M. 2009. Efficacy Comparison of Some New Natural-Product Herbicides for Weed Control at Two Growth Stages. *Weed Technol.* **23**: 431–437.
- Aćimović, S.G., Cregg, B.M., Sundin, G.W., and Wise, J.C. 2016. Comparison of drill- and needle-based tree injection technologies in healing of trunk injection ports on apple trees. *Urban For. Urban Green.* **19**: 151–157.
- Aćimović, S.G., Zeng, Q., McGhee, G.C., Sundin, G.W., and Wise, J.C. 2015. Control of fire blight (*Erwinia amylovora*) on apple trees with trunk-injected plant resistance inducers and antibiotics and assessment of induction of pathogenesis-related protein genes. *Front. Plant Sci.* **6**: 1–10.
- Allen, S.B., Dwyer, J.P., Wallace, D.C., and Cook, E.A. 2003. Missouri River Flood of 1993: Role of Woody Corridor Width in Levee Protection. *J. Am. Water Resour. Assoc.* **39**: 923–933.
- Amato, M., Basso, B., Celano, G., Bitella, G., Morelli, G., and Rossi, R. 2008. In situ detection of tree root distribution and biomass by multi-electrode resistivity imaging. *Tree Physiol.* **28**: 1441–1448.
- Anderegg, W.R., Berry, J.A., and Field, C.B. 2012. Linking definitions, mechanisms, and modeling of drought-induced tree death. *Trends Plant Sci.* **17**: 693–700.
- Apse, M.P., and Blumwald, E. 2007. Na⁺ transport in plants. *FEBS Lett.* **581**: 2247–2254.
- Arbonnier, P. 1957. La dévitalisation des feuillus par le sulfamate d'ammonium. *Rev. For. Fr.* **6**: 458–469.
- Arbonnier, P., and Delabreze, P. 1971. La dévitalisation du charme (*Carpinus betulus L.*) par dépôts de phytocides à l'aide d'un appareil-injecteur. *Ann. Sci. For.* **28**: 359–389.
- Arioz, O. 2007. Effects of elevated temperatures on properties of concrete. *Fire Saf. J.* **42**: 516–522.
- Ascoli, D., Lonati, M., Marzano, R., Bovio, G., Cavallero, A., and Lombardi, G. 2013. Prescribed burning and browsing to control tree encroachment in southern European heathlands. *For. Ecol. Manag.* **289**: 69–77.
- Atger, C., and Edelin, C. 1994. Premières données sur l'architecture comparée des systèmes racinaires et caulinaires. *Can. J. Bot.* **72**: 963–975.
- Baldwin, H.I. 1934. Some Physiological Effects of Girdling Northern Hardwoods. *Bull. Torrey Bot. Club* **61**: 249–257.
- Bambara, G. 2016. Évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente. Thèse de Doctorat. Aix Marseille Université.
- Barbaroux, C., Bréda, N., and Dufrêne, E. 2003. Distribution of above-ground and below-ground carbohydrate reserves in adult trees of two contrasting broad-leaved species (*Quercus petraea* and *Fagus sylvatica*). *New Phytol.* **157**: 605–615.
- Barker, A.V., and Probst, R.G. 2014. Management of Vegetation by Alternative Practices in Fields and Roadsides. *Int. J. Agron.* **2014**: 1–12.
- Baron, J., and Gomez, G. 2015. *Académie de Montpellier*. <http://sciences-physiques.ac-montpellier.fr/ABCDORGA/Famille4/PESTICIDES.htm#HERBICIDES> (Accessed March 26, 2015).

- Bastien, Y., and Gauberville, C. 2011. Vocabulaire forestier. Ecologie, gestion et conservation des espaces boisés.
- Batoufflet, P. 2016. Rapport 2015 de l'inspecteur de la sûreté hydraulique.
- Bayoumi, A., and Meguid, M.A. 2011. Wildlife and Safety of Earthen Structures: A Review. *J. Fail. Anal. Prev.* **11**: 295–319.
- Beal, E.J., Henricot, B., Peace, A.J., Waghorn, I. a. G., and Denton, J.O. 2015. The action of allicin against *Armillaria* spp. *in vitro*. *For. Pathol.* **45**: 450–458.
- Bell, H.A., Cuthbertson, A.G., and Audsley, N. 2016. The potential use of allicin as a biopesticide for the control of the house fly, *Musca domestica* L. *Int. J. Pest Manag.* **62**: 111–118.
- Bellefontaine, R. 2005. Pour de nombreux ligneux, la reproduction sexuée n'est pas la seule voie: analyse de 875 cas. *Sci. Chang. Planétaires Sécher.* **16**: 315–317.
- Bellefontaine, R., Edelin, C., Ichaou, A., Laurens, D.D., Monsarrat, A., and Loquai, C. 2001. Le drageonnage, alternative aux semis et aux plantations de ligneux dans les zones semi-arides: protocole de recherches. *Sci. Chang. Planétaires Sécher.* **11**: 221–6.
- Bellefontaine, R., Sabir, M., Kokou, K., Guinko, S., Saadou, M., Ichaou, A., Hatem, C., Bationo, B.A., Karim, S., and Douma, M. 2005. Argumentaire pour l'étude et l'utilisation des marcottes et drageons dans les pays à faible couvert ligneux. *Sci. Chang. Planétaires Sécher.* **16**: 312–314.
- Bernard, J.-L. 2017. Phytopharmacopée française: soixante-dix ans d'évolution. *Phytoma* **700**: 37–41.
- Bigler, C., and Bugmann, H. 2004. Predicting the time of tree death using dendrochronological data. *Ecol. Appl.* **14**: 902–914.
- Billon, R., Gauvrit, C., and Chauvel, B. 2017. Du sel pour contrôler l'ambrosie: une recette efficace ? *Phytoma* **700**: 45–48.
- Binggeli, F. 1997a. Dix ans de brûlage dirigé dans les forêts du Massif des Maures. *For. Méditerranée* **18**: 311–317.
- Binggeli, F. 1997b. Elagage et éclaircie thermique en DFCI: mécanisme, indications, modes d'emploi, incidences. **18**: 318–326.
- Bloemen, J., Agneessens, L., Van Meulebroek, L., Aubrey, D.P., McGuire, M.A., Teskey, R.O., and Steppe, K. 2014. Stem girdling affects the quantity of CO₂ transported in xylem as well as CO₂ efflux from soil. *New Phytol.* **201**: 897–907.
- Bock, C.H., Brenneman, T.B., Hotchkiss, M.W., and Wood, B.W. 2013. Trunk applications of phosphite for the control of foliar and fruit scab on pecan. *Crop Prot.* **54**: 213–220.
- Boivin, G. 2001. Parasitoïdes et lutte biologique: paradigme ou panacée ? *VertigO - Rev. Électronique En Sci. Environ.* **2**: 1–8.
- Bond, W.J., and Midgley, J.J. 2001. Ecology of sprouting in woody plants: the persistence niche. *Trends Ecol. Evol.* **16**: 45–51.
- Bonnardot, A. 2012. L'arbre en hiver Coulommiers: C.A.U.E. 77.

- Bonnemain, J.-L., and Fromard, L. 1987. Physiologie comparée des cellules compagnes du phloème et des cellules associées aux vaisseaux. *Bull. Société Bot. Fr. Actual. Bot.* **134**: 27–37.
- Bonner, J. 1950. The role of toxic substances in the interactions of higher plants. *Bot. Rev.* **16**: 51–65.
- Bourguet, D., and Guillemaud, T. 2016. The hidden and external costs of pesticide use In: Lichtfouse, E., Ed., Sustainable Agriculture Reviews. Springer International Publishing, pp. 35–120.
- Bowes, B.G., and Mauseth, J.D. 2012. Structure des plantes Editions Quae.
- Brando, P.M., Nepstad, D.C., Balch, J.K., Bolker, B., Christman, M.C., Coe, M., and Putz, F.E. 2012. Fire-induced tree mortality in a neotropical forest: the roles of bark traits, tree size, wood density and fire behavior. *Glob. Change Biol.* **18**: 630–641.
- Bréda, N., Huc, R., Granier, A., and Dreyer, E. 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann. For. Sci.* **63**: 625–644.
- Brown, H.R. 2013. The Theory of the Rise of Sap in Trees: Some Historical and Conceptual Remarks. *Phys. Perspect.* **15**: 320–358.
- Burke, M.J., Gusta, L.V., Quamme, H.A., Weiser, C.J., and Li, P.H. 1976. Freezing and Injury in Plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* **27**: 507–528.
- Bush, D. 1995. Calcium regulation in plant cells and its roles in signaling. *Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol* **46**: 95–122.
- Cannon, W.A. 1949. A Tentative Classification of Root Systems. *Ecology* **30**: 542–548.
- Canny, M.J. 1995. A New Theory for the Ascent of Sap—Cohesion Supported by Tissue Pressure. *Ann. Bot.* **75**: 343–357.
- Casida, J.E., and Quistad, G.B. 1998. Golden age of insecticide research: past, present, or future? *Annu. Rev. Entomol.* **43**: 1–16.
- CEPRIS 2011. La gestion des digues de protection contre les inondations Centre Européen de Prévention du Risque d’Inondation.
- Charrier, G. 2011. Mécanismes et modélisation de l’acclimatation au gel des arbres: Application au noyer *Juglans regia L.* . Thèse de Doctorat. université Blaise Pascal.
- Charrier, G., and Améglio, T. 2011. The timing of leaf fall affects cold acclimation by interactions with air temperature through water and carbohydrate contents. *Environ. Exp. Bot.* **72**: 351–357.
- Charrier, G., Charra-Vaskou, K., Kasuga, J., Cochard, H., Mayr, S., and Améglio, T. 2014. Freeze-thaw stress: effects of temperature on hydraulic conductivity and ultrasonic activity in ten woody angiosperms. *Plant Physiol.* **164**: 992–998.
- Charrier, G., Ngao, J., Saudreau, M., and Améglio, T. 2015. Effects of environmental factors and management practices on microclimate, winter physiology, and frost resistance in trees. *Funct. Plant Ecol.* **6**: 1–18.

- Chen, J.-J., Zhang, J., and He, X.-Q. 2014. Tissue regeneration after bark girdling: an ideal research tool to investigate plant vascular development and regeneration. *Physiol. Plant.* **151**: 147–155.
- Cheng, F., and Cheng, Z. 2015. Research progress on the use of plant allelopathy in agriculture and the physiological and ecological mechanisms of allelopathy. *Front. Plant Sci.* **6**: 1–16.
- Choi, S.-T., Song, W.-D., Park, D.-S., and Kang, S.-M. 2010. Effect of different girdling dates on tree growth, fruit characteristics and reserve accumulation in a late-maturing persimmon. *Sci. Hortic.* **126**: 152–155.
- Collin, P., and Dumas, Y. 2009. Que savons-nous de l'ailante (*Ailanthus altissima*(Miller) Swingle) ? *Rev. For. Fr.* **61**: 117–130.
- Concept.Cours.d'EAU SCOP, and TERE0 2016. Savoirs et savoir-faire sur les populations exotiques envahissantes végétales et animales et préconisations pour la mise en œuvre des SDAGE (réf. 062) Etude réalisée pour le compte de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse.
- Cowan, M.M. 1999. Plant Products as Antimicrobial Agents. *Clin. Microbiol. Rev.* **12**: 564–582.
- Crassous, C., and Karas, F. 2007. Guide de gestion des tourbières et marais alcalins des vallées alluviales de France septentrionale. Fédération des Conservatoires d'Espaces Naturels.
- Cruiziat, P. 2007. Comprendre la montée de la sève dans les arbres: De Hales (1727) à Dixon (1914) In: Robin, P., J.P. Aeschlimann, C. Feller, S. Renoir, and Histoires et Agronomies : Entre Ruptures et Durée : Colloque International, Montpellier (FRA), 2004/10/20-22, Eds., Histoire et agronomie : entre ruptures et durée. Paris: IRD, pp. 203–214.
- Cruiziat, P., Cochard, H., and Améglio, T. 2002. Hydraulic architecture of trees: main concepts and results. *Ann. For. Sci.* **59**: 723–752.
- Culliney, T.W. 2005. Benefits of Classical Biological Control for Managing Invasive Plants. *Crit. Rev. Plant Sci.* **24**: 131–150.
- Curran, J.C., and Hession, W.C. 2013. Vegetative impacts on hydraulics and sediment processes across the fluvial system. *J. Hydrol.* **505**: 364–376.
- Dal Maso, E., Cocking, J., and Montecchio, L. 2014. Efficacy tests on commercial fungicides against ash dieback in vitro and by trunk injection. *Urban For. Urban Green.* **13**: 697–703.
- Dan Marks 2005. Technical manual for dam owners : Impacts of animals on earthen dams.
- Danjon, F., and Fourcaud, T. 2009. L'arbre et son enracinement. *Innov. Agron.* **6**: 17–37.
- De la Fouchardière, G. 1967. Les lecteurs en parlent: la dévitalisation par annellation. *Rev. For. Fr.* **6**: 416–418.
- De la Fouchardière, G. 1969. An economical method to plant resinous trees in coppice. *Rev. For. Fr.* **3**: 205–208.
- Decoin, M. 2014. Désherbage en ZNA: Compamed évalue les outils. *Phytoma* **675**: 33–35.
- Decoin, M. 2015. Dossier Zones non agricoles - Réglementation : un tempo difficile à suivre. *Phytoma* **685**: 16–17.

- Decoin, M. 2017. Utilisation des phytos: le paradoxe des deux arrêtés. *Phytoma* **701**: 9–10.
- Décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques. 2015.
- Del Tredici, P. 2001. Sprouting in temperate trees: a morphological and ecological review. *Bot. Rev.* **67**: 121–140.
- Delabraze, P. 1971. About some implements to devitalize more easily trees through application of phytocides in notches. *Rev. For. Fr.* **23**: 45–49.
- Delage, C., Evette, A., Daumergue, N., Huyghe, G., and Jacob, F. 2017. Évaluation de la réussite de l'ouvrage de protection de berges de la Romanche au barrage de Livet, réalisé à l'aide de techniques de génie végétal. *Sci. Eaux Territ.* 6 p.
- Demolis, C., and Gama, A. 1990. Dévitalisation chimique de souches de noisetier et de frêne In: Versailles, pp. 41–53.
- Demolis, C., Maugard, M., Francois, D., Sandoz, P., Degueurce, R., and Duboz, J. 1990. Chemical devitalization of stumps of hazel-trees and ash-trees. *Bull. Tech. - Off. Natl. Forêts* **18**: 41–53.
- Dickinson, M.B., and Johnson, E.A. 2004. Temperature-dependent rate models of vascular cambium cell mortality. *Can. J. For. Res.* **34**: 546–559.
- Dinant, S. 2008. Phloem, transport between organs and long-distance signalling. *C R Biol.* **331**: 334–346.
- Direction des Espaces Verts 2011. Essais sur la dévitalisation des souches d'arbres à l'ail Ville de Lyon.
- DiTomaso, J.M., Van Steenwyk, R.A., Nowierski, R.M., Vollmer, J.L., Lane, E., Chilton, E., Burch, P.L., Cowan, P.E., Zimmerman, K., and Dionigi, C.P. 2017. Enhancing the effectiveness of biological control programs of invasive species through a more comprehensive pest management approach. *Pest Manag. Sci.* **73**: 9–13.
- Dobbertin, M., and Brang, P. 2001. Crown defoliation improves tree mortality models. *For. Ecol. Manag.* **141**: 271–284.
- Douglas Shields, F. 2016. Synthesis of levee vegetation research Results (2007–2014) California: The California Department of Water Resources.
- Doussan, I., and Thevenot, G. 2013. Le droit de la protection phytosanitaire et l'objectif de protection de la santé et de l'environnement : une intégration à parfaire In: Dutilleul, F.C., Ed., Penser une démocratie alimentaire (vol. I). Inida (Costa Rica), p. 193.
- Drénou, C. 2009. Les racines: face cachée des arbres IDF.
- Drénou, C. 2016. L'arbre : Au-delà des idées reçues CNPF.
- Dreyfus, P. 1999. Diversity of functional approaches to the dynamics and production of tree stands: Relevance to forest management. **51**: 281–297.
- Dubois, M., and Plancke, M.P. 2010. Development of glyphosate resistant weeds: situation and perspectives in France. In: Association Française de Protection des Plantes (AFPP), pp. 65–74.

- Ducrey, M., and Turrel, M. 1992. Influence of cutting methods and dates on stump sprouting in Holm oak (*Quercus ilex* L.) coppice. *Ann. Sci. For.* **49**: 449–464.
- Dufour, S., and Piégay, H. 2006. Forêts riveraines des cours d'eau et ripisylves: spécificités, fonction et gestion. *Rev Fr* **LVIII**: 339–350.
- Evans, G.J., and Bellinder, R.R. 2009. The potential use of vinegar and a clove oil herbicide for weed control in sweet corn, potato, and onion. *Weed Technol.* **23**: 120–128.
- Evans, N.H., McAinsh, M.R., and Hetherington, A.M. 2001. Calcium oscillations in higher plants. *Curr. Opin. Plant Biol.* **4**: 415–420.
- Evette, A., Zanetti, C., Cavaillé, P., Dommanget, F., Mériaux, P., and Vennetier, M. 2014. La gestion paradoxale des ripisylves des cours d'eau de piedmont alpin endigués. *J. Alp. Res. Rev. Géographie Alp.* **102-4**: 1–13.
- Ewers, F.W., Améglio, T., Cochard, H., Beaujard, F., Martignac, M., Vandame, M., Bodet, C., and Cruiziat, P. 2001. Seasonal variation in xylem pressure of walnut trees: root and stem pressures. *Tree Physiol.* **21**: 1123–1132.
- Fan, G., Xia, Y., Lin, X., Hu, H., Wang, X., Ruan, C., Lu, L., and Liu, B. 2016. Evaluation of thermotherapy against Huanglongbing (citrus greening) in the greenhouse. *J. Integr. Agric.* **15**: 111–119.
- Fenner, K., Canonica, S., Wackett, L.P., and Elsner, M. 2013. Evaluating pesticide degradation in the environment: blind spots and emerging opportunities. *Science* **341**: 752–758.
- Fernández-Aparicio, M., Bernard, A., Falchetto, L., Marget, P., Chauvel, B., Steinberg, C., Morris, C.E., Gibot-Leclerc, S., Boari, A., Vurro, M., et al. 2017. Investigation of amino acids as herbicides for control of orobanche minor parasitism in red clover. *Front. Plant Sci.* **8**: 1–12.
- Fitter, A.H., and Stickland, T.R. 1991. Architectural analysis of plant root systems 2. Influence of nutrient supply on architecture in contrasting plant species. *New Phytol.* **118**: 383–389.
- Flower, C.E., Dalton, J.E., Knight, K.S., Brikha, M., and Gonzalez-Meler, M.A. 2015. To treat or not to treat: Diminishing effectiveness of emamectin benzoate tree injections in ash trees heavily infested by emerald ash borer. *Urban For. Urban Green.* **14**: 790–795.
- Franklin, J.F., Shugart, H.H., and Harmon, M.E. 1987. Tree Death as an Ecological Process. *BioScience* **37**: 550–556.
- Frechilla, S., Talbott, L.D., Bogomolni, R.A., and Zeiger, E. 2000. Reversal of Blue Light-Stimulated Stomatal Opening by Green Light. *Plant Cell Physiol.* **41**: 171–176.
- Gama, A., and Dumas, Y. 1995. Dépressage chimique de taillis de chataignier In: Reims, p. 8.
- Gauvrit, C. 1996. Efficacité et sélectivité des herbicides Editions Quae.
- Gay T., Conservatoires d'espaces naturels, and Pôle-Relais Tourbières 2010. Dévitalisation de bouleaux par cerclage sur la Grande Seigne de Passonfontaine (25).
- Georghiou, G.P., and Mellon, R.B. 1983. Pesticide Resistance in Time and Space In: Georghiou, G.P., and T. Saito, Eds., Pest Resistance to Pesticides. Springer US, pp. 1–46.

- Geyer, W.A., Neppel, T., Brooks, K., and Carlisle, J. 2000. Woody Vegetation Protects Streambank Stability during the 1993 Flood in Central Kansas. *J. Soil Water Conserv.* **55**: 483–486.
- Gignoux, J., Clobert, J., and Menaut, J.-C. 1997. Alternative fire resistance strategies in savanna trees. *Oecologia* **110**: 576–583.
- Gomez, L., Jordan, M.-O., Adamowicz, S., Leiser, H., and Pagès, L. 2003. Du prélèvement au dosage: réflexions sur les problèmes posés par la mesure des glucides non structuraux chez les végétaux ligneux. *Cah. Agric.* **12**: 369–386.
- Goodman, R.N., and Novacky, A.J. 1994. The hypersensitive reaction in plants to pathogens: a resistance phenomenon. American Phytopathological Society (APS).
- Gulke, N., and Retzlaff, B. 2001. Changes in physiological attributes of Ponderosa pine from seedling to mature tree. *Tree Physiol.* **21**: 275–86.
- Gschwantner, T., Schadauer, K., Vidal, C., Lanz, A., Tomppo, E., Cosmo, L. di, Robert, N., Englert Duursma, D., and Lawrence, M. 2009. Common tree definitions for national forest inventories in Europe. *Silva Fenn.* **43**: 303–321.
- Hacke, U., and Sauter, J.J. 1996. Xylem dysfunction during winter and recovery of hydraulic conductivity in diffuse-porous and ring-porous trees. *Oecologia* **105**: 435–439.
- Halford, M., Boisson, S., Harzé, M., Le Stradic, S., Mahy, G., Piqueray, J., Pitz, C., Seleck, M., and Monty, A. 2014. Les plantes invasives.
- Hallé, F. 1986. The growth and form of modular organisms - Modular growth in seed plants. *Phil Trans R Soc Lond B* **313**: 77–87.
- Hanana, M., Hamrouni, L., Cagnac, O., and Blumwald, E. 2011. Mécanismes et stratégies cellulaires de tolérance à la salinité (NaCl) chez les plantes. *Environ. Rev.* **19**: 121–140.
- Harivel, A., Bellefontaine, R., and Boly, O. 2006. Aptitude à la multiplication végétative de huit espèces forestières d'intérêt au Burkina Faso. *Bois For. Trop.* **2**: 39–50.
- Haury, J., and Damien, J.-P. 2014. De nouvelles mauvaises herbes en zones humides: les formes terrestres des Jussies invasives sur prairies. *Sci. Eaux Territ.* **15**: 16–21.
- Hauteclair, P. 2009. Fiche de gestion du réseau nature pour les plantations forestières.
- Hollander, M., Wolfe, D.A., and Chicken, E. 2013. Nonparametric statistical methods John Wiley & Sons.
- Hopkins, W.G. 2003. Physiologie végétale De Boeck Supérieur.
- Hsiao, T.C., and Xu, L.-K. 2000. Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport. *J. Exp. Bot.* **51**: 1595–1616.
- Huffaker, C.B. 2012. Theory and practice of biological control Elsevier.
- Hughes, R.F., Johnson, M.T., and Uowolo, A. 2001. The invasive alien tree *Falcataria moluccana*: its impacts and management In: Prospects for Weed Biological Control in Pacific Islands. US, pp. 218–223.

- Jordan, M.-O. 2015. C depletion and tree dieback in young peach trees: a possible consequence of N shortage? *Ann. For. Sci.* **72**: 529–537.
- Just, M.G., Schafer, J.L., Hohmann, M.G., and Hoffmann, W.A. 2016. Wood decay and the persistence of resprouting species in pyrophilic ecosystems. *Trees* 1–9.
- Kabeya, D., Sakai, A., Matsui, K., and Sakai, S. 2003. Resprouting ability of *Quercus crispula* seedlings depends on the vegetation cover of their microhabitats. *J. Plant Res.* **116**: 207–216.
- Kacprzyk, M., Bednarz, B., and Kuznik, E. 2014. Dead Trees in beech stands of the Bieszczady National Park: quantitative and qualitative structure of associated macrofungi. *Appl. Ecol. Environ. Res.* **12**: 325–344.
- Kert, C. 2008. Rapport sur l'amélioration de la sécurité des barrages et ouvrages hydrauliques.
- Kilroy, B., and Windell, K. 1999. Tree girdling tools Missoula: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Missoula Technology and Development Center.
- Knight, K.S., Flash, B.P., Kappler, R.H., Throckmorton, J.A., Grafton, B., and Flower, C.E. 2014. Monitoring ash (*Fraxinus*spp.) decline and emerald ash borer (*Agrilus planipennis*) symptoms in infested areas Gen Tech Rep NRS-139. US Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, Newtown Square, PA.
- Komura, R., Kamata, N., Kubo, M., and Muramoto, K. 2005. Identification of dead tree of Japanese oak wilt (JOW) using high spatial resolution satellite imagery New York: Ieee.
- Koop, H. 1987. Vegetative reproduction of trees in some European natural forests. *Vegetatio* **72**: 103–110.
- Lachat, B., ADAM, P., and Debiais, N. 1997. Le génie végétal au service de la restauration des berges en région Pays de la Loire : Exemples sur la Sarthe et sur la Mayenne. Orléans.
- Lagasse, P.F., Clopper, P.E., Thornton, C.I., Jr, S., D, F., McCullah, J., and Spitz, W.J. 2016. Evaluation and assessment of environmentally sensitive stream bank protection measures Washington, DC 20001 United States: NCHRP.
- Landhäuser, S.M., and Lieffers, V.J. 2003. Seasonal changes in carbohydrate reserves in mature northern *Populus tremuloïdes* clones. *Trees - Struct. Funct.* **17**: 471–476.
- Lawson, T. 2009. Guard cell photosynthesis and stomatal function. *New Phytol.* **181**: 13–34.
- Lebourgeois, F., Differt, J., Chuine, I., Ulrich, E., Cecchini, S., and Lanier, M. 2006a. Observations phénologiques des arbres forestiers: concepts, intérêts et problématiques actuelles. *RDV Tech. ONF* **13**: 19–22.
- Lebourgeois, F., Pierrat, J.-C., Godfroy, P., Ulrich, E., Cecchini, S., and Lanier, M. 2006b. Phénologie des peuplements du réseau RENECOFOR: variabilité entre espèces et dans l'espace, et déterminisme climatique. *RDV Tech. ONF* **13**: 23–26.
- Leroux, P. 2003. Modes d'action des produits phytosanitaires sur les organismes pathogènes des plantes. *C. R. Biol.* **326**: 9–21.

- Lev-Yadun, S., and Aloni, R. 1992. The role of wounding and partial girdling in differentiation of vascular rays. *Int. J. Plant Sci.* **153**: 348–357.
- Loescher, W.H., McCamant, T., and Keller, J.D. 1990. Carbohydrate reserves, translocation, and storage in woody plant roots. *HortScience* **25**: 274–281.
- Loo, D.D.F., Zeuthen, T., Chandy, G., and Wright, E.M. 1996. Cotransport of water by the Na⁺/glucose cotransporter. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **93**: 13367–13370.
- Louda, S.M., Pemberton, R.W., Johnson, M.T., and Follett, P.A. 2003. Nontarget effects - The achilles' hell of biological control? Retrospective analyses to reduce risk associated with biocontrol introductions. *Annu. Rev. Entomol.* **48**: 365–396.
- Macia, J. 2014. Identification et essais de techniques biochimiques de dévitalisation des arbres générant des risques sur les ouvrages hydrauliques Marseille.
- Macia, J., Liency, N., and Zanetti, C. 2016a. Contrôle des arbres sur ouvrages hydrauliques: quelles solutions dans le contexte actuel? *Environ. Tech.* **357**: 64–66.
- Macia, J., Zanetti, C., and Liency, N. 2016b. Expérimentation éco-pâturage caprin, Parement amont RG-Retenu de Vallabrègue ARBEAUSolutions.
- Maillier, S., and François, R. 2008. Dévitaliser des souches de saules en marais tourbeux alcalin | Espaces naturels. *Espace Nat.* **22**: 32–33.
- Maillier, S., and François, R. 2008. Dévitaliser les souches de saules en marais tourbeux alcalins. *Espace Nat.* 32–33.
- Marchand, P.A., Jonis, M., Furet, A., Aveline, N., Isembert, C., Parveaud, C.-E., Chovelon, M., Oste, S., Gomez, C., Lambion, J., et al. 2014. Évaluation des caractéristiques et de l'intérêt agronomique de préparations simples de plantes, pour des productions fruitières, légumières et viticoles économes en intrants. *Innov. Agron.* **34**: 83–96.
- Martin, C., and Thicoïpe, J.P. 1994. La solarisation. Une désinfection des sols alternative ou complémentaire des fumigants chimiques? *Phytoma* **464**: 34–36.
- Mary, B. 2016. Développement de l'imagerie des systèmes racinaires dans les ouvrages hydrauliques en remblai par tomographie électrique et acoustique. Thèse de Doctorat. Aix-Marseille.
- Mary, B., Saracco, G., Peyras, L., Mériaux, P., Vennetier, M., and Zanetti, C. 2013. Vers le développement de méthodes géophysiques pour la détection de racines ligneuses dans les ouvrages hydrauliques en remblai In: 31èmes Rencontres de l'AUGC. p. 11.
- Mary, B., Saracco, G., Peyras, L., Vennetier, M., Mériaux, P., and Camerlynck, C. 2016. Mapping tree root system in dikes using induced polarization: Focus on the influence of soil water content. *J. Appl. Geophys.*
- Mataa, M., Tominaga, S., and Kozaki, I. 1998. The effect of time of girdling on carbohydrate contents and fruiting in Ponkan mandarin (*Citrus reticulata* Blanco). *Sci. Hortic.* **73**: 203–211.
- Matula, R., Damborská, L., Nečasová, M., Geršl, M., and Šrámek, M. 2015. Measuring Biomass and Carbon Stock in Resprouting Woody Plants. *PLOS ONE* **10**: 1–14.

- Maurice, J. 1959. Contribution à l'étude de la cicatrisation des végétaux. *Bull. Société Bot. Fr.* 186–196.
- McCullagh, P., and Nelder, J.A. 1989. Generalized linear models, Second Edition CRC Press.
- McDowell, N.G. 2011. Mechanisms linking drought, hydraulics, carbon metabolism, and vegetation mortality. *Plant Physiol.* **155**: 1051–1059.
- Menozi, M.J., and Dutartre, A. 2007. Gestion des plantes envahissantes : limites techniques et innovations socio-techniques appliquées au cas des jussies. *Ingénieries - E T* **49**: 49–36.
- Merceron, N.R., Lamarque, L.J., Delzon, S., and Porté, A.J. 2016. Killing it softly: girdling as an efficient eco-friendly method to locally remove invasive acer negundo. *Ecol. Restor.* **4**: 297–305.
- Mériaux, P., and Royet, P. 2007. Surveillance, maintenance and diagnosis of flood protection dikes: a practical handbook for owners and operators Editions Quae.
- Mériaux, P., Vennetier, M., and Zanetti, C. 2015. Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai Cardère.
- Michelot, P. 2010. La production en pépinière : Des références techniques à la certification environnementale Lavoisier.
- Montecchio, L. 2013. A venturi effect can help cure trees. *J Vis Exp* **80**: 1–8.
- Monteuuis, O. 1984. La multiplication végétative du séquoia géant en vue du clonage In: Annales de Recherches Sylvicoles. pp. 139–171.
- Moore, W. 1997. Compartimentation de la pourriture dans l'arbre : l'atelier de l'arbre.
- Moore, W. 2003. Le modèle des zones de l'arbre. *Arbres et Sciences* **2**: 1–39.
- Moreira, B., Tormo, J., and Pausas, J.G. 2012. To resprout or not to resprout: factors driving intraspecific variability in resprouting. *Oikos* **121**: 1577–1584.
- Morin, X., Améglio, T., Ahas, R., Kurz-Besson, C., Lanta, V., Lebourgeois, F., Miglietta, F., and Chuine, I. 2007. Variation in cold hardiness and carbohydrate concentration from dormancy induction to bud burst among provenances of three European oak species. *Tree Physiol.* **27**: 817–825.
- Nageleisen, L.-M. 1993. The decay of deciduous tree species in France. *Rev. For. Fr.* **6**: 1–16.
- Navarro, C., Fernández-Escobar, R., and Benloch, M. 1992. A low-pressure, trunk-injection method for introducing chemical formulations into olive trees. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **117**: 357–360.
- Negreros-Castillo, P., and Hall, R.B. 1994. Four methods for partial overstory removal in tropical forests in Mexico. *J. Environ. Manage.* **41**: 237–243.
- Nemenyi, P.B. 1963. Distribution-free Multiple Comparisons. PhD thesis. Princeton University.
- Newcombe, R.G. 1998. Interval estimation for the difference between independent proportions: comparison of eleven methods. *Stat. Med.* **17**: 873–890.
- Nice, G., and Johnson, B. 2009. A comparison of “natural products” for organic production Purdue University: Purdue Extension - Weed Science.

- Noel, A.R.A. 1970. The girdled tree. *Bot. Rev.* **36**: 162–195.
- Oldeman, R.A. 1972. L'architecture de la végétation ripicole forestière des fleuves et criques guyanais. *Adansonia* **12**: 253–265.
- Pages, L., and Aries, F. 1988. SARAH: modèle de simulation de la croissance, du développement et de l'architecture des systèmes racinaires. *Agronomie* **10**: 889–896.
- Paoletti, E., Manning, W.J., Spaziani, F., and Tagliaferro, F. 2007. Gravitational infusion of ethylenediurea (EDU) into trunks protected adult European ash trees (*Fraxinus excelsior* L.) from foliar ozone injury. *Environ. Pollut.* **145**: 869–873.
- Papstein, F., Sedlak, J., Polak, J., Svobodova, L., Hassan, M., and Bryxiova, M. 2008. Results of in vitro thermotherapy of apple cultivars. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **94**: 347–352.
- Pashe, D. 2007. Gestion des plantes exotiques envahissantes dans le canton de Vaud.
- Peñuelas, J., and Munné-Bosch, S. 2010. Potentially immortal? *New Phytol.* **187**: 564–567.
- Perez, L., Andre, N., Gutleben, C., Vendeville, J., Lacordaire, A.-I., Maury, A., and Chapin, E. 2010. Palmier, efficacité curative du nématode *Steinemema carpocapsae* contre le papillon palmivore *Paysandisia archon*: résultats d'essais conduits dans des jardins et espaces verts. *Phytoma- Déf. Végétaux* **637**: 14–17.
- Pickard, W.F. 1981. The ascent of sap in plants. *Prog. Biophys. Mol. Biol.* **37**: 181–229.
- Pimont, F., Dupuy, J.-L., Rigolot, E., and Duché, Y. 2012. Les effets du passage d'un feu dans un peuplement arboré: synthèse des connaissances et applications pour le gestionnaire forestier méditerranéen. *RDV Tech. ONF* **35**: 3–15.
- Pina, A., and Errea, P. 2005. A review of a new advances in mechanism of graft compatibility-incompatibility. *Sci. Hortic.* **106**: 1–11.
- Poirier, M. 2008. Etude écophysiological de l'endurcissement au gel des arbres: impact des conditions estivales de croissance sur la résistance au gel des arbres. Thèse de Doctorat. Clermont-Ferrand 2.
- Prieur, L., and C.R.E.A.B 2010. Maîtriser les adventices dans les cultures biologiques. *Agronomie* **1**: 1–4.
- R Core Team 2016. R: A language and environment for statistical computing. Vienne: Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Raven, P., Johnson, G.-B., Mason, K., Losos, J., and Singer, S. 2011. Biologie De Boeck.
- Reddy, A.R., Chaitanya, K.V., and Vivekanandan, M. 2004. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *J. Plant Physiol.* **161**: 1189–1202.
- Reddy, P.P. 2012. Soil solarisation In: Recent Advances in Crop Protection. Springer, New Delhi, pp. 159–183.
- Regier, N., Streb, S., Zeeman, S.C., and Frey, B. 2010. Seasonal changes in starch and sugar content of poplar (*Populus deltoides* × *nigra* cv. Dorskamp) and the impact of stem girdling on carbohydrate allocation to roots. *Tree Physiol.* **30**: 979–987.

- Regnault-Roger, C., Philogène, B.J.R., and Vincent, C. 2008. Biopesticides d'origine végétale (2e éd.) Lavoisier.
- Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G., and Muys, B. 2007. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees* **21**: 385–402.
- Risopatron, J.P.M., Sun, Y., and Jones, B.J. 2010. The vascular cambium: molecular control of cellular structure. *Protoplasma* **247**: 145–161.
- Roach, W.A. 1939. Plant injection as a physiological method. *Ann. Bot.* **3**: 155–226.
- Roach, W.A., and Roberts, W.O. 1945. Further work on plant injection for diagnostic and curative purposes. *J. Pomol. Hortic. Sci.* **21**: 108–119.
- Roussel, L. 1978. Lumière, gourmands et rejets de souches. *Revue Forestière Française* **3**: 186–197.
- Salguero-Gómez, R., Shefferson, R.P., and Hutchings, M.J. 2013. Plants do not count... or do they? New perspectives on the universality of senescence. *J. Ecol.* **101**: 545–554.
- Sánchez-Calderón, L., Ibarra-Cortés, M.E., and Zepeda-Jazo, I. 2013. Root development and abiotic stress adaptation In: *Abiotic Stress - Plant Responses and Applications in Agriculture*. pp. 135–168.
- Sands, D.C., and Pilgeram, A.L. 2009. Methods for selecting hypervirulent biocontrol agents of weeds: why and how. *Pest Manag. Sci.* **65**: 581–587.
- Sands, D.C., Pilgeram, A.L., Zidack, N.K., Jacobsen, B.J., and Tiourebaev, K.S. 2003. Enhancing the Efficacy of Bioherbicides In: *Pseudomonas Syringae and Related Pathogens*. Springer, Dordrecht, pp. 431–441.
- Santos, A. de C. e 1980. Essai de Classification des Arbres Tropicaux Selon Leur Capacité de Reiteration. *Biotropica* **12**: 187–194.
- Sauter, J.J. 1980. Seasonal Variation of Sucrose Content in the Xylem Sap of Salix. *Z. Für Pflanzenphysiol.* **98**: 377–391.
- Sauter, J.J., and Cleve, B. van 1994. Storage, mobilization and interrelations of starch, sugars, protein and fat in the ray storage tissue of poplar trees. *Trees* **8**: 297–304.
- Savatier, J., Pépin, N., Sénéchal, G., Zanetti, C., Liency, N., Morellato, D., Fourquet, L., Saquet, J.P., Jouathel, D., Libourel, N., et al. 2016. Toulouse dykes: reducing failure hazard combining structural reinforcement works and organization measures In: *E3S Web of Conferences*. p. 14005.
- Scheidecker, D. 1961. La greffe, ses conditions anatomiques, ses conséquences physiologiques et ses résultats génétiques éventuels. *Ann Biol* **37**: 107–172.
- Schiavon, M., Perrin-Ganier, C., and Portal, J.M. 1995. La pollution de l'eau par les produits phytosanitaires: état et origine. *Agronomie* **15**: 157–170.
- Schnelle, F., and Volkert, E. 1974. International phenological gardens in Europe: the basic network for international phenological observations In: Lieth, H., Ed., *Phenology and Seasonality Modeling*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 383–387.

Service des Risques Naturels et Hydrauliques, and Service Technique de l'Énergie Électrique, des Grands Barrages et de l'Hydraulique 2014. Bilan national du contrôle des ouvrages hydrauliques (année 2012) Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.

Service des Risques Naturels et Hydrauliques, and Service Technique de l'Énergie Électrique, des Grands Barrages et de l'Hydraulique 2016. Bilan national du contrôle des ouvrages hydrauliques (année 2014) Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.

Sharp, M., Dupray, S., Tourment, R., Pohl, R., Schelfhout, H., Williamson, T., and Gamst Povlotsky, K. 2013. The international levee handbook Londres.

Shigo, A.L. 1984. Compartmentalization: a conceptual framework for understanding how trees grow and defend themselves. *Annu. Rev. Phytopathol.* **22**: 189–214.

Shigo, A.L. 1986. A new tree biology: facts, photos, and philosophies on trees and their problems and proper care Shigo and Trees.

Shigo, A.L., and Dudzik, K.R. 1985. Response of uninjured cambium to xylem injury. *Wood Sci. Technol.* **19**: 195–200.

Shigo, A.L., Money, W.E., and Dodds, D.I. 1977a. Some internal effects of Mauguet tree injections. *J. Arboric.* **3**: 213–220.

Shigo, A.L., Shortle, W., and Garrett, P. 1977b. Compartmentalization of discolored and decayed wood associated with injection-type wounds in hybrid poplar. *J. Arboric.* **3**: 114–118.

Simon, A., and Collison, A.J.C. 2002. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surf. Process. Landf.* **27**: 527–546.

Sinfort, C., Cotteux, E., Bonicelli, B., Ruelle, B., Douchin, M., Berenger, M., Lagrevol, J., Liet, O., and Rudnicki, V.D. 2009. Influence des conditions et matériels de pulvérisation sur les pertes de pesticides au sol et dans l'air en viticulture Languedocienne In: Colloque National du Groupe Français d'études et d'applications des pesticides. p. 4.

Singh, S. 2016. Root pressure: getting to the root of pressure In: Progress in Botany 77. Springer, Cham, pp. 105–150.

SNCF Réseau 2017. <https://www.sncf-reseau.fr/fr/reportages/ecopaturation> (Accessed September 5, 2017).

Sperry, J.S., Donnelly, J.R., and Tyree, M.T. 1988. Seasonal occurrence of xylem embolism in sugar maple (*Acer saccharum*). *Am. J. Bot.* **75**: 1212–1218.

Stapleton, J.J., and Devay, J.E. 1982. Effect of soil solarization on populations of selected soilborne microorganisms and growth of deciduous fruit tree seedlings. *Phytopathology* **72**: 323–326.

Steudle, E. 2002. Transport of water in plants. *Environ. Control Biol.* **40**: 29–37.

Stiling, P., and Cornelissen, T. 2005. What makes a successful biocontrol agent? A meta-analysis of biological control agent performance. *Biol. Control* **34**: 236–246.

Swezy, D.M., and Agee, J.K. 1991. Prescribed-fire effects on fine-root and tree mortality in old-growth ponderosa pine. *Can. J. For. Res.* **21**: 626–634.

- Taiz, L., and Zeiger, E. 2010. Plant physiology Sinauer Associates.
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I.M., and Murphy, A. 2015. Plant physiology and development, Sixth Edition Sinauer Associates.
- Thomas, H. 2013. Senescence, ageing and death of the whole plant. *New Phytol.* **197**: 696–711.
- Thompson, M.V. 2006. Phloem: the long and the short of it. *Trends Plant Sci.* **11**: 26–32.
- Tracy, F.T., and Corcoran, M.K. 2012. Effect of Woody Vegetation on Hydraulic Conductivity at Various Levee Systems Using Numerical Models In: pp. 1–9.
- Tracy, F.T., and Corcoran, M.K. 2014. Effect of changes in hydraulic conductivity on exit gradient at selected levee systems using numerical models. *Open Hydrol. J.* **8**: 27–40.
- Turgeon, R., and Wolf, S. 2009. Phloem transport: cellular pathways and molecular trafficking. *Annu. Rev. Plant Biol.* **60**: 207–221.
- Unternehner, E. 2016. *Reporterre, le quotidien de l'écologie*. <https://reporterre.net/La-SNCF-recrute-des-moutons-pour-desherber-ses-voies> (Accessed September 5, 2017).
- Van Bel, A.J.E., and Gaupels, F. 2004. Pathogen-induced resistance and alarm signals in the phloem. *Mol. Plant Pathol.* **5**: 495–504.
- Van Der Werf, H. 1997. Evaluer l'impact des pesticides sur l'environnement. *Courr. Environ. INRA* **31**: 5–22.
- Van Leeuwen, C., Guigal, P., and Pieri, P. 1998. Observations sur les incidences du bâchage de la vigne à l'aide d'un film en matière plastique sur le raisin et la qualité du vin (Saint-Emilions, 1995 et 1996). *J Int Sci Vigne Vin* **32**: 129–136.
- Vanholme, R., Demedts, B., Morreel, K., Ralph, J., and Boerjan, W. 2010. Lignin biosynthesis and structure. *Plant Physiol.* **153**: 895–905.
- VanWoerkom, A.H., Aćimović, S.G., Sundin, G.W., Cregg, B.M., Mota-Sanchez, D., Vandervoort, C., and Wise, J.C. 2014. Trunk injection: an alternative technique for pesticide delivery in apples. *Crop Prot.* **65**: 173–185.
- Vennetier, M., Chandioix, O., and Ripert, C. 2006. Diagnostic et gestion de la végétation sur et dans l'environnement des digues In: Aix en Provence, pp. 551–567.
- Vennetier, M., Ripert, C., Chandioix, O., Mériaux, P., and Doirat, G. 2004. Gestion de la végétation des digues et berges sous contrainte de sécurité. *Ingénieries-EAT n° Spécial "Ingénierie Ecologique"*: 25–36.
- Vennetier, M., Zanetti, C., Meriaux, P., and Mary, B. 2014. Tree root architecture: new insights from a comprehensive study on dikes. *Plant Soil* **387**: 81–101.
- Venturas, M.D., Sperry, J.S., and Hacke, U.G. 2017. Plant xylem hydraulics: what we understand, current research, and future challenges. *J. Integr. Plant Biol.* **59**: 356–389.
- Verger, M. 2000. Multiplication végétative des ligneux forestiers, fruitiers et ornementaux. Actes. [CD-Rom]. In: CIRAD-Inra, p. 194.

- Vesk, P.A., Warton, D.I., and Westoby, M. 2004. Sprouting by semi-arid plants: testing a dichotomy and predictive traits. *Oikos* **107**: 72–89.
- Vilagrosa, A., Chirino, E., Peguero-Pina, J.J., Barigah, T.S., Cochard, H., and Gil-Pelegri n, E. 2012. Xylem cavitation and embolism in plants living in water-limited ecosystems In: Aroca, R., Ed., Plant Responses to Drought Stress. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 63–109.
- Vinet, F., Boissier, L., and Defosse, S. 2011. La mortalit e comme expression de la vuln erabilit e humaine face aux catastrophes naturelles: deux inondations récentes en France (Xynthia, var, 2010). *Vertigo Rev.  lectronique En Sci. Environ.* **112**: 1–23.
- Vurro, M., Boari, A., Pilgeram, A.L., and Sands, D.C. 2006. Exogenous amino acids inhibit seed germination and tubercle formation by *Orobancha ramosa* (Broomrape): Potential application for management of parasitic weeds. *Biol. Control* **36**: 258–265.
- Wang, G.G. 2003. Early regeneration and growth dynamics of *Populus tremuloides* suckers in relation to fire severity. *Can. J. For. Res.* **33**: 1998–2006.
- Welling, A., and Palva, E.T. 2006. Molecular control of cold acclimation in trees. *Physiol. Plant.* **127**: 167–181.
- West, J.B. 2013. Marcello Malpighi and the discovery of the pulmonary capillaries and alveoli. *Am. J. Physiol. - Lung Cell. Mol. Physiol.* **304**: 383–390.
- Williams, L.E., and Ayars, J.E. 2005. Water use of Thompson Seedless grapevines as affected by the application of gibberellic acid (GA₃) and trunk girdling – practices to increase berry size. *Agric. For. Meteorol.* **129**: 85–94.
- Windt, C.W., Vergeldt, F.J., De Jager, P.A., and Van As, H. 2006. MRI of long-distance water transport: a comparison of the phloem and xylem flow characteristics and dynamics in poplar, castor bean, tomato and tobacco. *Plant Cell Environ.* **29**: 1715–1729.
- Witt, W., and Sauter, J.J. 1994. Starch metabolism in poplar wood ray cells during spring mobilization and summer deposition. *Physiol. Plant.* **92**: 9–16.
- Woodcock, H., Vollenweider, P., Dubs, R., and Hofer, R.-M. 1995. Crown alterations induced by decline: a study of relationships between growth rate and crown morphology in beech (*Fagus sylvatica* L.). *Trees* **9**: 279–288.
- Wunder, J., Reineking, B., Matter, J.-F., Bigler, C., and Bugmann, H. 2007. Predicting tree death for *Fagus sylvatica* and *Abies alba* using permanent plot data. *J. Veg. Sci.* **18**: 525–534.
- Wyk, B.E. van, and Wink, M. 2017. Medicinal plants of the world. Timber Press.
- Young, S.L. 2004. Natural Product Herbicides for Control of Annual Vegetation Along Roadsides. *Weed Technol.* **18**: 580–587.
- Zanetti, C. 2010. Caractérisation du développement des systèmes racinaires ligneux dans les digues. Thèse de Doctorat. Université de Provence - IRSTEA Aix en Provence.
- Zanetti, C. 2013. Développement racinaires et risques sur digues et berges de cours d’eau Aix en Provence.

Zanetti, C., Vennetier, M., and Mériaux, P. 2013. Développement et décomposition des systèmes racinaires : risques induits pour les digues et solutions de gestion In: Dignes Maritimes et Fluviales de Protection Contre Les Submersions. Hermès Lavoisier, pp. 536–540.

Zanetti, C., Vennetier, M., Mériaux, P., and Provansal, M. 2014. Plasticity of tree root system structure in contrasting soil materials and environmental conditions. *Plant Soil* **387**: 21–35.

Zanetti, C., Vennetier, M., Mériaux, P., Royet, P., Dufour, S., and Provansal, M. 2008. L'enracinement des arbres dans les digues en remblai: étude des systèmes racinaires et impacts sur la sécurité des ouvrages. *Ingénieries Eau-Agric.-Territ.* **53**: 49–67.

Zeppel, M.J.B., Harrison, S.P., Adams, H.D., Kelley, D.I., Li, G., Tissue, D.T., Dawson, T.E., Fensham, R., Medlyn, B.E., Palmer, A., et al. 2015. Drought and resprouting plants. *New Phytol.* **206**: 583–589.

Zhengli, L., and Keming, C. 1988. Differentiation of secondary xylem after girdling. *IAWA J.* **9**: 375–383.

Zhu, X.B., Cox, R.M., and Arp, P.A. 2000. Effects of xylem cavitation and freezing injury on dieback of yellow birch (*Betula alleghaniensis*) in relation to a simulated winter thaw. *Tree Physiol.* **20**: 541–547.

Zimmermann, M.H., and Milburn, J.A. 2012. Transport in plants I: phloem transport Springer Science & Business Media.

Zwieniecki, M.A., Melcher, P.J., Feild, T.S., and Holbrook, N.M. 2004. A potential role for xylem-phloem interactions in the hydraulic architecture of trees: effects of phloem girdling on xylem hydraulic conductance. *Tree Physiol.* **24**: 911–917.

ANNEXES

L'ensemble des annexes sont gardées confidentielles par souhait d'ARBEAUSOLutions, financeur de ce travail de doctorat réalisé dans le cadre d'une CIFRE

