



**HAL**  
open science

# Évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente

G. Bambara

► **To cite this version:**

G. Bambara. Évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente. Sciences de l'environnement. Doctorat en Géosciences de l'Environnement, 2016. Français. NNT : 2016AIXM4301 . tel-02603435

**HAL Id: tel-02603435**

**<https://hal.inrae.fr/tel-02603435v1>**

Submitted on 16 May 2020

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

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

Ecole doctorale Sciences de l'Environnement

**Thèse**

Présentée par

**Gisèle BAMBARA**

Pour obtenir le grade de :

***Docteur d'université***

***Spécialité : Géosciences de l'Environnement***

***Evaluation de la performance des  
ouvrages hydrauliques en remblai  
soumis à la présence de végétation  
arborescente***

*Dirigée par Corinne CURT*

Soutenue publiquement le 25 janvier 2016 devant le jury composé de :

Sylvie BARRAUD	Professeure, INSA Lyon	Rapporteur
Corinne CURT	Ingénieur de recherche, HDR, Irstea Aix-en-Provence	Directrice
Youssef DIAB	Professeur, Université Paris Est	Examineur
Farimah MASROURI	Professeure, Université de Lorraine	Examineur
Jean-Michel ROGER	Ingénieur en Chef des Ponts, Eaux et Forêts, HDR, Irstea Montpellier	Rapporteur
Damien SERRE	Professeur, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse	Examineur
Michel VENNETIER	Ingénieur de recherche, Irstea Aix-en-Provence	Co-directeur
Pierre VANLOOT	Maitre de conférences, Aix-Marseille Université	Co-directeur



« Il n'y a que deux sortes de gens dans la vie si on réfléchit bien, il y a ceux qui parlent et ceux qui agissent. La plupart des gens ne font que parler, ils parlent et c'est tout. Mais au bout du compte, c'est ceux qui agissent qui changent le monde. Et en changeant le monde ils nous changent aussi. C'est pour cela qu'on ne les oublie jamais. Vous, vous êtes dans quel camp ? Du genre à vous écouter parler ou à vous bouger ? Parce-que croyez-moi, tout le reste c'est que des conneries... ». (*The Boondock Saints*, 1999)

Le plus beau défi de notre existence est de découvrir qui nous sommes vraiment, le second est de vivre de façon à honorer ce que nous avons découvert. (Mana hui)

Je ne perds jamais. Soit je gagne, soit j'apprends. (Nelson Mandela)

**Ma fille, je te dédie ce mémoire**





## Aux arbres

Arbres de la forêt, vous connaissez mon âme !  
Au gré des envieux, la foule loue et blâme ;  
Vous me connaissez, vous ! – vous m’avez vu souvent,  
Seul dans vos profondeurs, regardant et rêvant.  
Vous le savez, la pierre où court un scarabée,  
Une humble goutte d’eau de fleur en fleur tombée,  
Un nuage, un oiseau, m’occupent tout un jour.  
La contemplation m’emplit le cœur d’amour.  
Vous m’avez vu cent fois, dans la vallée obscure,  
Avec ces mots que dit l’esprit à la nature,  
Questionner tout bas vos rameaux palpitants,  
Et du même regard poursuivre en même temps,  
Pensif, le front baissé, l’œil dans l’herbe profonde,  
L’étude d’un atome et l’étude du monde.  
Attentif à vos bruits qui parlent tous un peu,  
Arbres, vous m’avez vu fuir l’homme et chercher Dieu !  
Feuilles qui tressaillez à la pointe des branches,  
Nids dont le vent au loin sème les plumes blanches,  
Clairières, vallons verts, déserts sombre et doux,  
Vous savez que je suis calme et pur comme vous.  
Comme au ciel vos parfums, mon culte à Dieu s’élance,

Et je suis plein d’oubli comme vous de silence !  
La haine sur mon nom répand en vain son fiel ;  
Toujours, - je vous atteste, ô bois aimés du ciel !-  
J’ai chassé loin de moi toute pensée amère,  
Et mon cœur est encore tel que le fit ma mère !

Arbres de ces grands bois qui frissonnez toujours,  
Je vous aime, et vous, lierre au seuil des autres sourds,  
Ravins où l’on entend filtrer les sources vives,  
Buissons que les oiseaux pillent, joyeux convives !  
Quand je suis parmi vous, arbres de ces grands bois,  
Dans tout ce qui m’entoure et me cache à la fois,  
Dans votre solitude où je rentre en moi-même,  
Je sens quelqu’un de grand qui m’écoutent et qui  
m’aime !  
Aussi, taillis sacrés où Dieu même apparaît,  
Arbres religieux, chênes, mousses, forêts,  
Forêts ! C’est dans votre ombre et dans votre mystère,  
C’est sous votre branchage auguste et solitaire,  
Que je veux abriter mon sépulcre ignoré,  
Et que je veux dormir quand je m’endormirai.

Victor Hugo



## **Remerciements**

Ce mémoire conclut trois années (et quelques mois...☺) d'un travail qui fut à la fois rempli de joie, de tristesse, de peur et de colère. Bien que les quatre émotions de base se soient entrechoquées au cours de ces « approximativement » 1215 jours, cette expérience professionnelle a été passionnante : OUI je conseille « La Thèse » aux étudiants qui auraient encore des doutes ! Je n'étais pourtant pas, « a priori », destinée à réaliser un doctorat : sortie d'un Master professionnel, j'avais entamé ma carrière en tant qu'ingénieur d'étude contractuel au sein d'Irstea. C'est après deux années à ce poste qu'il m'a été proposé de tenter l'aventure... Aventure qui a été possible grâce aux financements de la région PACA et de l'Europe. Je commencerai mes remerciements à partir de cet instant.

Dans la vie, certaines personnes aident à nous construire et à dessiner notre avenir. On apprend, on grandit et on avance. Parce qu'on nous fait confiance tout en nous laissant prendre des initiatives et des responsabilités, parce qu'on nous encourage, parce qu'on nous guide... pour ces raisons et depuis mes débuts à Irstea je tiens à exprimer toute ma gratitude à M<sup>f</sup> Laurent Peyras, directeur adjoint de l'unité de recherche Risques, ECOsystèmes, Vulnérabilité, Environnement, Résilience. Merci Laurent, c'est en grande partie grâce à vous.

L'achèvement de ce travail est en soi un merveilleux accomplissement personnel mais il est important de souligner qu'il est le fruit d'une fusion de matière grise importante...

Mille mercis à ma directrice de thèse, M<sup>me</sup> Corinne Curt, pour son investissement et ses précieux conseils qui m'ont aidé à mener à bien cette thèse. Merci pour la confiance que tu m'as accordée et tes encouragements qui m'ont permis de relever des défis parfois difficiles à atteindre. J'ai énormément apprécié travailler avec toi et je te suis très reconnaissante pour tout ce que tu m'as appris.

Je remercie sincèrement mes co-directeurs, Messieurs Pierre Vanloot et Michel Vennetier, pour leur disponibilité et leur patience. Michel merci pour ta disponibilité sans faille, tes explications toujours claires et constructives et tes relectures notamment vis-à-vis de l'anglais. Pierre, un merci tout particulier pour le temps que tu as passé à m'expliquer ce domaine qu'est la SPIR et qui était pour moi quasiment inconnu jusqu'alors.

J'adresse toute ma reconnaissance à M. Patrice Mériaux pour son aide et ses conseils toujours avisés, ainsi que pour sa bonne humeur constante. Merci, vous m'avez tant appris, notamment sur le terrain.

M<sup>me</sup> Sylvie Barraud et M<sup>f</sup> Jean-Michel Roger, je vous adresse mes sincères remerciements pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Les avis constructifs que vous avez émis sur le mémoire m'ont permis de préparer ma soutenance de manière optimale. Mme Farimah Masrouri, merci pour l'honneur que vous m'avez fait en présidant mon jury de thèse. Messieurs Youssef Diab et Damien Serre merci d'avoir accepté de juger ce travail. Ainsi, je remercie l'ensemble de mon jury pour les commentaires constructifs et l'intérêt qu'il a porté à mon travail.

Ce travail et notamment la construction du modèle d'évaluation de la performance n'aurait pas pu être réalisé sans la participation des membres du comité d'expertise. Messieurs Laurent Peyras, Patrice Mériaux et Rémy Tourment, je vous remercie sincèrement pour ces nombreuses heures de réflexion. Les séances d'expertise passées avec vous et les validations sur le terrain ont été riches en enseignements. De bonnes conversations et réflexions collectives avec des experts tels que vous sont bien plus enrichissantes que des recherches bibliographiques solitaires !

Rémy, je tiens à te remercier pour tout ce que tu m'as appris sur les ouvrages hydrauliques, notamment sur les digues de protection, depuis ton enseignement dans le Master GERINAT jusqu'à aujourd'hui.

La partie expérimentale de mes travaux de thèse, représente un travail long, physique et fastidieux. En effet, il a fallu s'improviser à la fois bûcheron, un peu menuisier et chimiste ! Ainsi, je remercie de

tout cœur mes stagiaires sans qui, il m'aurait été très difficile de rendre les résultats tels qu'ils le sont présentés dans ce mémoire. Un grand merci à mon frère Daniel Bambara pour la mise en place des protocoles, notamment pour la préparation des échantillons (tu es maintenant expert en découpe☺) et d'extraction de cellulose, hémicellulose et lignine. Merci également pour le petit séjour sur le terrain en Isère où tu as été digne des plus grands « bûcherons du marais »☺ (et je sais bien que le terrain n'est pas ton fort). Merci à Oriane Porteils pour avoir continué les extractions et enfin à Jordan Lambert pour s'être également improvisé bûcheron, vraiment merci tu as été d'une efficacité remarquable et tu as réussi à terminer dans les délais l'ensemble des mesures qu'il restait à faire.

Un grand merci à tous les participants du projet RISBA : collègues italiens, grenoblois et aixois. La participation à ce projet a été pour moi un réel plaisir. Des rencontres très sympathiques et enrichissantes, des moments de convivialité exceptionnels (notamment dans certains restos italiens vraiment, vraiment supers☺) et un projet qui a été une vraie réussite, conclut brillamment par deux séminaires de restitution.

Les modèles d'évaluation ont été appliqués sur différents tronçons de digues et plusieurs petits barrages, je tiens à remercier les gestionnaires et propriétaires qui nous ont laissé utiliser leurs ouvrages à titre de cobaye ! Un Grand Merci à tous les « testeurs » des modèles qui sont parfois venu de loin afin de participer aux applications. Ainsi, je tiens à remercier Jean-Marc, son stagiaire (M. Di Ciocco), Laure, Laurent, Rémy, Patrice, Corinne, Florian, Marika, Davide et Massimiliano.

Un grand merci à toutes les personnes de l'unité RECOVER d'Irstea, Aix-en-Provence (encore présentes ou pas) pour leurs qualités humaines et professionnelles. Il règne une ambiance unique à Irstea qui fait que l'on s'y sent bien. Ce climat contribue indéniablement à la réussite et à l'épanouissement. Ainsi, je tiens à remercier toutes les personnes avec qui j'ai passé de bons moments et des échanges très sympathiques, avant, pendant et après mes trois années de thèse : Laurent, Rémy T., Huguette, Corinne, Patrice, Claudio, Paul, Gérard D., Martine S., Martine W., Sébastien, Guillaume V., Pascal D., Nadia (un grand merci Nadia, c'est grâce à ta confiance si j'ai pu intégrer Irstea, merci de toujours m'avoir encouragée), Yves, Faustine, Guillaume N., Fabienne, Alain B., Pierre P., Stéphane, Sylvie, Naaim, Li-Hua, Florian B., Etienne, Mathieu, Alain G., Christian, Gérard, Ange, Rémy B., Dominique, Raymond, Catherine, Evelyne, Monique, Christiane, Roland, Pascal C., Stéphanie, Aminata, Sophie, Walid, Felix, Mohamed, Marika, Nabgha, Raphael, Caroline, Bruno, Marc, Ismail, Djibril, Anthony, Simon, Benjamin, Laetitia, Michel, Jordan, Sabrina, Florian G., Paola, Jenniffer, Emeline, Ayala, Juliet, Alban, Philippe C.... Et sûrement bien d'autres, la liste est longue !

Merci aux collègues grenoblois de l'équipe ADRET ou plus largement du TR RIVAGE avec qui j'ai eu l'occasion de passer de très bons moments également.

Au cours de ma thèse, j'ai été rattaché au laboratoire LISA METICA de l'université Aix-Marseille. Je remercie sincèrement l'ensemble de l'équipe qui m'a accueilli et intégré comme une doctorante à part entière de leur laboratoire. Merci Sandrine, Pierre, Nathalie, Yveline, Catherine, Sofia, Amine et tous ceux que j'ai pu croiser dans les couloirs du labo.

Je tiens à remercier l'AD Isère Drac Romanche et plus particulièrement M. Jean François Gomez, pour nous avoir permis d'extraire des souches d'arbres de leurs digues et également pour nous permettre de suivre la décomposition des racines grâce au dispositif expérimental installé sur leur ouvrage. De la même manière, je remercie EDF et notre interlocuteur M. Florian Carraz pour nous permettre de suivre la décomposition d'échantillons de racines sur le dispositif expérimental implanté sur la digue de fermeture du barrage de Castérino.

La Compagnie Nationale du Rhône (CNR) a été partenaire socio-économique de ce projet de thèse. Merci pour l'intérêt que vous avez porté à mon travail, notamment au travers de la présence de M. Romain Brusson à chaque comité de pilotage. Merci également à M. Alain Demangeat et Mme Agnès Parizotto pour leur soutien.

Je remercie toutes les personnes que j'ai pu rencontrer au cours de ces trois années de thèse et qui se sont intéressées de près ou de loin à mon travail. Merci, les échanges sont toujours constructifs.

« *Certaines personnes nous font rire un peu plus fort, rendent nos sourires un peu plus vrais et nos vies un peu mieux* » (citation anonyme), j'ai passé trois années magiques à vos côtés, surtout la dernière... Laeti, Simoune, Antho, et Benji, si j'ai le sourire chaque matin, c'est parce que j'aime mon boulot (Ok☺) mais c'est aussi parce que je vous vois ! Merci également à Ana pour ta gentillesse et ton soutien. Que de souvenirs inoubliables avec vous tous au travail comme en dehors..., j'espère de tout cœur que nous continuerons à en fabriquer. Merci du fond du cœur les amis, vous m'avez fait perdre 10 ans ☺ !

Benji, un petit mot spécial parce que la thèse, on l'a quand même menée au coude à coude ! Quelle chance d'avoir partagé ces moments avec toi ! Tes qualités humaines et professionnelles ont grandement contribué à faciliter et à réussir ce travail. Tu as été un soutien et un véritable ami ! Merci.

A Irstea on fait des nouvelles rencontres, mais on fait également perdurer de belles amitiés, Bruno quelle joie d'avoir pu, après ces deux années de Master, te retrouver à Irstea. Merci pour tes encouragements et ton soutien.

« *Un bon ami est difficile à trouver, difficile à perdre et impossible à oublier* » (citation anonyme), c'est bien vrai, malgré les années vous êtes toujours là ! Merci d'être vous, je vous adore : Ma Caille, Chouchou, P'tit chou, Lorenza, Fabie et ma Véro.

Merci Ninja... je n'oublie pas que c'est grâce à toi et tes encouragements si en 2007 j'ai repris mes études. Merci pour ta patience et ton aide pour les révisions de chaque partiel ! Quelle aventure ça a été ... et quel bonheur de reprendre ses études quand on a arrêté pendant un moment ! C'était tout simplement génial ! J'ai gardé tout cela en tête pendant ma thèse et je te dois aussi ce mémoire qui n'est pas une finalité en soi mais un bel achèvement ! Merci beaucoup !

Mes derniers remerciements iront à ma famille sans qui rien n'aurait été possible. Maman, Papa, Mon frère, Tatie, Tonton vous m'avez tant apporté et tant aidé. Merci infiniment, je ne sais pas si j'aurais pu y arriver seule, c'est une bonne question, mais en tout cas, cela a été indéniablement plus facile. Enfin, merci ma fille, tu as été patiente ! Merci de ta compréhension. Je te souhaite et te conseille de toujours faire ce que tu aimes et de ne jamais te décourager.

# Merci



## **Résumé**

L'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai est un enjeu majeur pour les gestionnaires en charge de leur sécurité. Qu'il s'agisse de digues ou de barrages, la présence de végétation arborescente représente un facteur de fragilité important. Deux types de mécanismes de détérioration peuvent ainsi être initiés ou aggravés : l'érosion interne et l'érosion externe. Or, ce facteur n'a été pris en compte que partiellement dans les modèles d'évaluation existants. De plus, les petits barrages en remblai peuvent avoir des dispositifs d'étanchéité différents et ne sont pas toujours équipés de drains et d'instruments d'auscultation: il est alors nécessaire d'adapter les modèles à chaque cas. L'objectif de la thèse est de répondre à ces verrous scientifiques. Les résultats de nos recherches concernent l'établissement de modèles d'évaluation de la performance basés sur des approches à base de connaissances. Plus spécifiquement les apports concernent :

- le développement d'indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente ;
- la mise au point d'une mesure indirecte pour l'estimation de l'état de décomposition des racines ligneuse par spectrométrie proche infrarouge ;
- l'amélioration des modèles d'évaluation des ouvrages à charge temporaire existants vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne et affouillement : formalisation de l'ensemble des indicateurs nécessaires à l'évaluation ;
- la proposition d'une approche modulaire permettant de prendre en compte le niveau d'équipement (présence/absence de dispositif de drainage) et d'instruments d'auscultation des ouvrages à charge permanente vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne.

La démarche a été appliquée sur des ouvrages réels : 3 tronçons de digues de protection contre les inondations ainsi que 7 barrages en remblai ce qui nous a permis de montrer sa pertinence et donc son potentiel d'utilisation opérationnelle.

**Mots clés :** ouvrages hydrauliques – végétation arborescente – performance – système à base de connaissance – spectrométrie proche infrarouge – chimiométrie



## ***Abstract***

The performance assessment of embankment hydraulic works is a major challenge for managers in charge of their security. For both dikes and dams, the presence of trees represents an important fragility factor. Two types of deterioration mechanism can thus be initiated or aggravated: internal erosion or scouring. However, this factor has been taken only partially into account in existing assessment models. In addition, small embankment dams can have different sealing devices and are not always equipped with drains and monitoring instruments: it is thus necessary to customize the models in each case. The aim of the thesis was to remove these scientific obstacles. The results of our research concern the design of performance assessment models relying on knowledge-based approaches. More specifically the contributions concern:

- the development of specific status indicators for trees;
- the development of an indirect measure for estimating the level of woody roots decay by near infrared spectroscopy;
- the improvement of existing assessment models for hydraulic works with intermittent head with respect to deterioration mechanisms by internal erosion and scouring: formalization of the whole set of necessary indicators
- the proposal for a modular approach taking the level of equipment (presence / absence of drainage device) and monitoring instrument into account for hydraulic works with permanent load with regard to deterioration mechanism by internal erosion.

The approach was implemented for real works: three sections of river dikes and seven small embankment dams which allowed us to show its relevance and therefore its operational potential.

**Key words:** hydraulic works – woody vegetation – performance – knowledge-based system – near infrared spectroscopy - chemometrics

## **Table des matières**

Remerciements.....	5
Résumé.....	2
Abstract.....	3
Table des matières .....	4
Table des illustrations .....	8
Liste des figures .....	8
Liste des tableaux.....	14
Glossaire .....	18
Introduction.....	20
Partie 1 .....	26
Problématique posée par l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques soumis à la présence d'une végétation arborescente .....	26
Chapitre 1. Les ouvrages hydrauliques et leur sécurité .....	28
1. Les ouvrages hydrauliques en remblai à charge temporaire et permanente.....	28
2. Les mécanismes de détérioration des ouvrages hydrauliques en remblai.....	32
Chapitre 2. La végétation arborescente et la sécurité des ouvrages hydrauliques en remblai ....	38
1. Influence de la végétation arborescente sur les mécanismes de détérioration des ouvrages hydrauliques .....	40
2. Approches pour la caractérisation de la décomposition des racines ligneuses .....	46
Chapitre 3. Approches pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques .....	52
1. Définitions liées à la performance des ouvrages hydrauliques .....	52
2. Méthodes pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques .....	53
Chapitre 4. Synthèse de la problématique et questions scientifiques associées.....	60
1. Synthèse de la problématique .....	60
2. Questions scientifiques .....	61
Partie 2 .....	62
Méthodologies pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente.....	62
Chapitre 1. Démarche méthodologique générale.....	64
1. Analyse des modèles existants pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai .....	64
2. Méthodologie générale adoptée pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente .....	69
Chapitre 2. Identification et formalisation des indicateurs d'état pour les modèles d'évaluation de la performance .....	71
1. Identification des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente.....	71
2. Formalisation des indicateurs d'état .....	72
Chapitre 3. Développement de mesures indirectes pour l'estimation du degré de décomposition des racines ligneuses .....	75

1. Dispositif expérimental.....	75
2. Evaluation qualitative de la décomposition des racines ligneuses in situ.....	78
3. Evaluation quantitative de la décomposition des racines ligneuses en laboratoire.....	81
4. Synthèse sur la méthodologie développée pour l'évaluation de l'état de décomposition des racines ligneuses.....	87
Chapitre 4. Démarche pour la construction des modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente.....	88
1. Amélioration du modèle de Vuillet (2012) pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire soumis à la présence de végétation arborescente.....	88
2. Amélioration et adaptation des modèles de Curt (2008) pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge permanente soumis à la présence de végétation arborescente.....	89
Chapitre 5. Procédure : démarche de calibration et de validation des modèles.....	91
1. Ouvrages hydrauliques à charge temporaire.....	91
2. Ouvrages hydrauliques à charge permanente.....	92
3. Validation : traitements des résultats obtenus.....	93
Chapitre 6. Synthèse générale.....	94
Partie 3.....	96
Résultats.....	96
Chapitre 1. Développement de mesures indirectes de la décomposition des racines.....	98
1. Evaluation qualitative.....	98
2. Evaluation quantitative.....	101
3. Synthèse.....	115
Chapitre 2. Identification et formalisation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente.....	116
1. Identification des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente.....	116
2. Formalisation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente.....	120
3. Synthèse.....	126
Chapitre 3. Evaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne et affouillement en présence de végétation arborescente.....	128
1. Evaluation vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne.....	128
2. Evaluation vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement.....	138
3. Synthèse.....	142
Chapitre 4. Evaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge permanente vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne en présence de végétation arborescente.....	144
1. Intégration des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente.....	144
2. Modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge permanente.....	145
3. Validation.....	149
Chapitre 5. Synthèse.....	150
Partie 4.....	152

Applications des modèles développés sur des cas réels d'ouvrages hydrauliques .....	152
Chapitre 1. Utilisation des modèles sur des digues de protection fluviales .....	154
1. Evaluation de la performance du tronçon, secteur Marignan .....	155
2. Synthèse et discussion des résultats obtenus.....	168
Chapitre 2. Applications sur des barrages en remblai.....	175
1. Evaluation du barrage de Grengia (Italie).....	177
2. Synthèse et discussion des résultats obtenus.....	183
Chapitre 3. Synthèse .....	188
Partie 5 .....	188
Apports de la thèse et perspectives .....	188
Chapitre 1. Apports de la thèse .....	190
1. Apports méthodologiques .....	190
2. Apports opérationnels .....	192
Chapitre 2. Perspectives de la thèse.....	194
1. Perspectives méthodologiques .....	194
2. Perspectives opérationnelles .....	197
Conclusion générale.....	200
Bibliographie .....	204
Valorisations des travaux de thèse.....	212
ANNEXES.....	216
ANNEXE 1. Principe du spectromètre Antaris II FT-NI, Thermo-Nicolet.....	218
ANNEXE 2. Synthèse des résultats issus des analyses qualitatives et quantitatives du dispositif expérimental de Castérino .....	219
ANNEXE 3. Répétabilité de la mesure de densité sèche par déplacement d'eau.....	225
ANNEXE 4. Tableaux synthétiques issus de l'AMDE pour l'identification des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente rassemblant les indicateurs associées à chaque fonction d'un ouvrage hydraulique en remblai à charge temporaire ou permanente.....	226
ANNEXE 5. Descriptif des tronçons de digue du Petit Rhône rive gauche, secteur du Mas de Cazeneuve et secteur du bois de Beaumont .....	231
ANNEXE 6. Descriptions et résultats des autres applications réalisées sur les barrages .....	235
ANNEXE 7. Notation des indicateurs d'état du barrage de Grengia (Italie).....	255



## Table des illustrations

### Liste des figures

Figure 1. Coupe type d'une vallée endiguée (Mériaux et al., 2004).....	28
Figure 2. Coupe type d'une digue de la Loire représentative d'une digue historique ((Mériaux et al., 2004) d'après (Dion, 1961)) .....	29
Figure 3. Tronçon aux caractéristiques homogènes de la digue de protection fluviale en remblai à Beaucaire-Fourques (13) (photo : Bambara G., 2012) .....	30
Figure 4. Coupe type simplifiée d'un ouvrage hydraulique à charge permanente en remblai homogène .....	31
Figure 5. Principe de l'érosion de conduit (extrait de l'ILH (Sharp et al., 2013) d'après Rémi Béguin) .....	33
Figure 6. Principe de l'érosion régressive (extrait de l'ILH (Sharp et al., 2013) d'après Rémi Béguin) .....	34
Figure 7. Principe de l'érosion de contact (Extrait de l'ILH (Sharp et al., 2013) d'après Rémi Béguin) .....	34
Figure 8. Principe de la suffusion (extrait de l'ILH (Sharp et al., 2013) d'après Rémi Béguin) ....	35
Figure 9. Les différents types d'érosion externe (a) érosion externe côté terre (b) érosion externe côté eau (c) érosion externe par surverse (Deniaud Y., CETMEF – extrait de l'ILH (Sharp et al., 2013)) .....	36
Figure 10. Les mécanismes d'instabilité côté eau et côté terre (a) glissement superficiel du corps de l'ouvrage, (b) glissement rotationnel du corps de l'ouvrage et sa fondation, (c) glissement translationnel du corps de l'ouvrage (Deniaud Y., CETMEF – extrait de (Sharp et al., 2013)) .....	37
Figure 11. Digue en remblai de protection contre les inondations en Isère (38) soumise à la présence de végétation arborescente (photo : Bambara G.).....	38
Figure 12. Les quatre types de structure racinaire d'un arbre.....	41
Figure 13. Exemple de conduit laissé par une grosse racine ligneuse après sa décomposition sur un ouvrage (photo : Zanetti, C.) .....	42
Figure 14. Illustration d'un arbre ayant une structure racinaire traçante, mixte ou fasciculé possédant une racine ou plusieurs racines traversant le remblai et pouvant induire un mécanisme de détérioration par érosion interne de conduit lors de la décomposition de ses racines ligneuses .....	42
Figure 15. Illustration d'un arbre ayant une structure racinaire de type fasciculé avec un nombre important de petites racines pouvant induire un mécanisme de détérioration d'érosion interne par suffusion .....	43
Figure 16. Développement de racines à l'interface du remblai-fondation du canal de Cuxac favorables à une érosion de contact (photo : Mériaux P.).....	44
Figure 17. Affouillement du pied d'une digue par les courants tourbillonnaires derrière un arbre tombé (photo : Zanetti C.).....	46
Figure 18. Principe de mesure de la densité d'un échantillon de bois par déplacement d'eau (d'après Chave (2006)) .....	49
Figure 19. Représentation d'un réseau de neurone simple à 3 couches (Rounds, 2002) .....	55
Figure 20. Architecture d'un système à base de connaissances.....	57
Figure 21. Les approches du diagnostic dans le domaine des ouvrages hydrauliques et représentation de leur complémentarité (adapté à partir de (Peyras, 2003)) .....	59
Figure 22. Structure hiérarchique des modèles développés par Curt (2008) et Vuillet (2012).....	64
Figure 23. Structure d'agrégation pour l'évaluation d'un indicateur de performance d'une digue fluviale vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne (Ci = critère ; EI= érosion interne ; Ai = agrégation ; IP= indicateur de performance ; MIN = minimum ; Moy-P* = moyenne pondérée) .....	66
Figure 24. Structure d'agrégation pour l'évaluation d'un indicateur de performance d'une digue fluviale vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement (Ci = critère ; AFF= affouillement ; Ai = agrégation ; IP= indicateur de performance ; MAX = maximum ; MIN = minimum) .....	66
Figure 25. Echelle d'évaluation double retenue pour l'évaluation de la performance des digues de protection fluviale (Vuillet, 2012) .....	67

Figure 26. Modèle hiérarchique pour l'évaluation de l'évaluation du remblai – cas d'un barrage homogène équipé d'un drain et d'instruments d'auscultation [ $\mu$ = performance ; $\Phi$ = phénomène] (Curt, 2008).....	68
Figure 27. Echelle d'évaluation double retenue pour l'évaluation de la performance des barrages (Curt, 2008).....	68
Figure 28. Méthodologie générale proposée dans la thèse .....	70
Figure 29. Echelle d'évaluation double harmonisée retenue pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente .....	73
Figure 30. Illustration des dispositifs expérimentaux suivis : (a) dispositif expérimental de l'Isère lors du déterrage des échantillons de racines ligneuses après 6 ans de décomposition (photo : Bambara, 2014) et (b) dispositif expérimental de Castérino lors du déterrage des échantillons de racines ligneuses après 4 ans de décomposition (photo : Bambara G., 2013) .....	75
Figure 31. Plan du dispositif sur la digue de l'Isère : organisation des panier et des échantillons (Zanetti, 2010).....	76
Figure 32. Plan du dispositif sur la digue de Castérino : organisation des paniers et des échantillons (Zanetti, 2010).....	76
Figure 33. Déterrage du dispositif de Castérino après 4 ans de décomposition (a) nettoyage de chaque échantillon avant d'effectuer les analyses qualitatives (b) évaluation visuelle et tactile de chaque échantillon à l'aide des différentes classes de décomposition (Sandström et al., 2007; Tobin et al., 2007)(c) évaluation de la résistance à la pénétration de la lame de couteau (Renvall, 1995) (Photo : Bambara G., 2013).....	80
Figure 34. Déterrage du dispositif expérimental de l'Isère après 6 ans de décomposition (a) déterrage des paniers à la pelle mécanique (b) pesée des échantillons frais (c) évaluation visuelle et tactile de chaque échantillon à l'aide des différentes classes de décomposition (Sandström et al., 2007; Tobin et al., 2007) et description de chaque échantillons (photo : Bambara G., 2014).....	80
Figure 35. Illustration du protocole d'estimation de la densité d'un échantillon par déplacement d'eau (a) pesée de l'échantillon sec (b) pesée de l'échantillon immergé dans l'eau du cristalliseur (photo : Bambara G., 2013) .....	81
Figure 36. Illustration du protocole de broyage (a) obtention de rondelles fines (b) broyage des morceaux de racines dans broyeur planétaire (c) sciure obtenue (photo : Bambara G., 2013) .....	82
Figure 37. Tamisage des échantillons de racines préalablement broyés : illustration des refus de tamis et obtention d'une sciure de granulométrie inférieure à 315 $\mu$ m (à gauche) (photo : Bambara G., 2013).....	82
Figure 38. Spectromètre Antaris II FT-NIR, Thermo-Nicolet du laboratoire LISA-METICA, Université Aix-Marseille (photo : Bambara G., 2013) .....	83
Figure 39. Exemple d'analyse ACP effectuée sur 3 groupes d'échantillons A, B et C (Gaydou, 2010).....	86
Figure 40. Méthodologie proposé dans la thèse pour le développement de mesures indirectes favorisant l'apport de connaissance sur l'état de décomposition des racines ligneuses.....	87
Figure 41. Evaluation d'un critère fonctionnel à partir des indicateurs d'état associés (IE = Indicateur d'état) .....	88
Figure 42. Méthodologie proposé dans la thèse pour répondre à la question scientifique principale et à la sous question scientifique posés dans cette thèse .....	94
Figure 43. Résultats de l'évaluation qualitative de la décomposition des échantillons de racines issus du dispositif expérimental de l'Isère (Echelle visuelle de 0 à 6 - Echelle de résistance de 0 à 4 ; C = Chêne, P = Peuplier, R = Robinier, F = Frêne). .....	99
Figure 44. Evolution de la densité en fonction du stade de décomposition et des diamètres pour chaque espèce issue du dispositif expérimental de l'Isère .....	102
Figure 45. Graphique représentant l'évolution de la densité en fonction des espèces et des stades de décomposition des échantillons issus du dispositif expérimental de l'Isère.....	103
Figure 46. Spectres de l'ensemble des échantillons avant (a) et après prétraitement EMSC (b) (n=192).....	104
Figure 47. Spectres de lignine, cellulose et hémicellulose. Identification de quelques bandes caractéristiques à chaque composé.....	105

Figure 48. Plan ½ de l'ACP de l'ensemble des échantillons du dispositif de l'Isère (n=192 ; variance expliquée = 91%) et visualisation de l'évolution des composés en lien avec les « loadings » _ (composés : C = cellulose ; He = Hémicellulose ; Li = Lignine) .....	106
Figure 49. « Loadings » de la PC1 issus des ACP effectués pour chaque essence de bois (n = 48) au cours de leur décomposition et loading de la PC1 de l'ensemble des échantillons (n=192) .....	107
Figure 50. Pan 1/3 de l'ACP à T0 (n=48 ; variance expliquée = 79%) _ (C = chêne ; F = frêne ; P = peuplier ; R = robinier) .....	108
Figure 51. Plan ½ de l'ACP à T2 (n=48 ; variance expliquée = 86%) _ (C = chêne ; F = frêne ; P = peuplier ; R = robinier) .....	109
Figure 52. Plan ½ de l'ACP à T4 (n=48 ; variance expliquée = 94%) _ (C = chêne ; F = frêne ; P = peuplier ; R = robinier) .....	110
Figure 53. Plan ½ de l'ACP à T6 (n=48 ; variance expliquée = 93%) _ (C = chêne ; F = frêne ; P = peuplier ; R = robinier) .....	111
Figure 54. Découpage d'un ouvrage hydraulique à charge temporaire en remblai homogène.....	116
Figure 55. Découpage d'un ouvrage à charge permanente en remblai homogène non équipé de drains, ni d'instruments d'auscultation et où l'implantation de la végétation n'est pas possible sur le parement amont sauf sur le couronnement (zone1).....	117
Figure 56. Mesure du collet d'un arbre (en rouge) pour la notation de l'indicateur d'état « Volume racinaire par individu » ( <i>photo : Bambara G., 2013</i> ).....	122
Figure 57. Clé d'aide à l'identification de la structure racinaire d'un individu ( <i>Zanetti et al., 2015</i> ) .....	123
Figure 58. Illustration de différents cas de déstructuration plus ou moins importante de protection du corps d'ouvrage (a) Soulèvement des blocs de pierre taillés du perré maçonné par un saule arborescent sur le Guil (b) Perré non jointoyé en cours de déstructuration par l'action des arbres et de leur racines au bord de la Sarre ( <i>photos : Mériaux P.</i> ) (c) enrochement de protection colonisé par les arbres et déstructuration des blocs (d) Arbres et arbustes installés sur le perré jointoyé de la digue rive droite du Guil à Eyglies (05), sans indice majeur de déstructuration ( <i>photo : Mériaux P.</i> ).....	125
Figure 59. Illustration d'arbres de haute tige, au port dangereusement penché, se développant au-dessus du niveau normal des eaux d'un petit barrage d'étang et ayant tendance à déstructurer la protection anti-batillage, ici par pieux-bois ( <i>photo : Mériaux P.</i> ).....	126
Figure 60. Critères fonctionnels nécessaires pour l'évaluation de l'indicateur de performance relatif au mécanisme de détérioration par érosion interne et méthodes associées pour leur évaluation .....	128
Figure 61. Diagramme d'agrégation des indicateurs d'état pour l'évaluation du critère fonctionnel C1, EI « Perméabilité du corps de digue » .....	133
Figure 62. Table de vérité experte pour l'agrégation des indicateurs d'état IE1.2 et IE1.3 du critère fonctionnel C1, EI « Perméabilité du corps de digue » .....	133
Figure 63. Diagramme d'agrégation des indicateurs d'état pour l'évaluation du critère fonctionnel C2, EI « Résistance du corps de digue à l'érosion interne » - (EI : érosion interne, cas 1 = absence de discontinuité ; cas 2 = présence de discontinuité) .....	134
Figure 64. Exemple de résultat de simulation pour l'évaluation du C1, EI « Perméabilité du corps de digue » par le groupe d'expertise.....	136
Figure 65. Vue du tronçon n°1 du talus coté rivière soumis à la présence d'une végétation arborescente de la digue de protection contre les inondations de Veynes (05) ( <i>photo : Bambara G., 2012</i> ).....	137
Figure 66. Diagramme d'agrégation des indicateurs d'état pour l'évaluation du critère fonctionnel C1, AFF « Résistance à l'affouillement de la protection du corps de digue côté cours d'eau » .....	141
Figure 67. Diagramme d'agrégation des indicateurs d'état pour l'évaluation du critère fonctionnel C3, AFF « Résistance à l'affouillement de la protection de la fondation côté cours d'eau ».....	142
Figure 68. Logique phénoménologique d'agrégation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente pour l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité .....	145
Figure 69. Modèle d'évaluation de la performance du remblai, de la fondation ou de l'interface d'un barrage en remblai si l'un des indicateurs d'état directs est activé .....	146
Figure 70. Représentation des différents modules nécessaires à l'évaluation de la performance du remblai vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne selon le type de barrage analysé .....	147



Figure 71. Modèle d'évaluation de la performance du remblai d'un barrage en remblai homogène vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne du fait de la présence de végétation arborescente (cas d'un barrage non équipé de drains ni d'instruments d'auscultation).....	148
Figure 72. Modèle d'évaluation de la performance de la fondation d'un barrage en remblai homogène vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne du fait de la présence de végétation arborescente.....	148
Figure 73. Modèle d'évaluation de la performance de l'interface remblai-fondation d'un barrage en remblai homogène vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne du fait de la présence de végétation arborescente.....	149
Figure 74. Localisation de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur du Mas Marignan : (a) localisation (cercle rouge) à l'échelle du Petit Rhône en aval de Saint Gilles ; (b) zoom sur la localisation du tronçon de digue choisi.....	155
Figure 75. Caractéristiques géométriques d'un profil en travers du tronçon de digue homogène évalué.....	155
Figure 76. Photo de la digue rive droite du Petit Rhône dans le secteur du Mas Marignan, bordé de végétation arborescente à chaque pied de l'ouvrage ( <i>photo : Bambara G., 2015</i> ).....	156
Figure 77. Evaluation par le modèle de la performance du critère fonctionnel C1, EI « Perméabilité du corps de digue » à partir des indicateurs d'état du tronçon homogène de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur Marignan (IE : Indicateurs d'état ; C : Critères fonctionnels ; EI : Erosion Interne).....	157
Figure 78. Gros peuplier présent sur le tronçon homogène évalué vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur Mas Marignan ( <i>photo : Bambara G., 2015</i> ).....	158
Figure 79. Evaluation par le modèle de la performance du critère fonctionnel C2, EI « Résistance du corps de digue à l'érosion interne » à partir des indicateurs d'état du tronçon homogène de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur Marignan (IE : Indicateurs d'état ; C : Critères fonctionnels ; EI : Erosion Interne).....	159
Figure 80. Evaluation par le modèle du critère fonctionnel C4, EI « Résistance de la fondation à l'érosion interne » à partir des indicateurs d'état du tronçon homogène de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur Marignan (IE : Indicateurs d'état ; C : Critères fonctionnels ; EI : Erosion Interne)..	160
Figure 81. Evaluation par le modèle de la performance du critère fonctionnel C5, EI « Résistance du corps de digue à l'érosion interne » à partir des indicateurs d'état du tronçon homogène de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur Marignan (IE : Indicateurs d'état ; C : Critères fonctionnels ; EI : Erosion Interne).....	161
Figure 82. Evaluation par le modèle de la performance vis-à-vis de l'érosion interne du tronçon homogène de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur Mas de Marignan à partir de la performance des critères fonctionnels (C : Critères fonctionnels ; EI : Erosion Interne, IP : Indicateur de Performance, MIN : Minimum, Moy.p* : Moyenne Pondérée [Moy (1/3) Ci, EI ; (2/3) Cj, EI]).....	162
Figure 83. Evaluation par le modèle de la performance vis-à-vis de l'érosion interne du tronçon homogène de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur Mas de Marignan à partir de la performance des critères fonctionnels sans prendre en compte la présence de la végétation arborescente (C : Critères fonctionnels ; EI : Erosion Interne, IP : Indicateur de Performance, MIN : Minimum, Moy.p* : Moyenne Pondérée [Moy (1/3) Ci, EI ; (2/3) Cj, EI]).....	163
Figure 84. Evaluation par le modèle de la performance du critère fonctionnel C2, AFF « Résistance à l'affouillement du corps de digue côté cours d'eau » à partir des indicateurs d'état du tronçon homogène de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur Marignan (IE : Indicateurs d'état ; C : Critères fonctionnels ; AFF : Affouillement).....	165
Figure 85. Vue du tronçon de digue homogène évalué côté cours d'eau ( <i>photo : Bambara G., 2015</i> ).....	165
Figure 86. Evaluation par le modèle de la performance du critère fonctionnel C4, AFF « Résistance à l'affouillement de la fondation côté cours d'eau » à partir des indicateurs d'état du tronçon homogène de la digue rive droite du petit Rhône, secteur Marignan (IE : Indicateurs d'état ; C : Critères fonctionnels ; AFF : Affouillement).....	166
Figure 87. Evaluation par le modèle de la performance vis-à-vis de l'affouillement du tronçon homogène de la digue rive droite du petit Rhône, secteur Mas de Marignan à partir de la performance	

des critères fonctionnels (C : Critères fonctionnels ; AFF : Affouillement, IP : Indicateur de Performance, MIN : Minimum, MAX : Maximum) .....	167
Figure 88. Représentation des notations des indicateurs d'état relatifs au critère C1, EI « Perméabilité du corps de digue » par chacun des trois experts (IE : Indicateur d'Etat ; Ci : critères) .....	171
Figure 89. Représentation des notations des indicateurs d'état relatifs au critère C2, EI « Résistance à l'érosion interne du corps de digue » par chacun des trois experts (IE : Indicateur d'Etat ; Ci : critères) .....	172
Figure 90. Représentation des résultats obtenus par le modèle pour l'évaluation des critères fonctionnels pour chacun des trois experts (C1, EI « Perméabilité du corps de digue », C2, EI « Résistance du corps de digue à l'érosion interne » et C3, EI « Singularité dans le corps de digue ») .....	172
Figure 91. Graphique représentant les notations des indicateurs d'état par les groupes d'évaluateurs « experts » et « ingénieurs » et résultat de l'évaluation du critère C1, EI « Perméabilité du corps de digue » à partir du modèle développé pour ces deux groupes .....	173
Figure 92. Les différentes applications réalisées sur des petits barrages .....	175
Figure 93. Répartition homogène des arbres sur le couronnement aval du barrage de Grengia, Italie (photo : Mériaux P., 2014) .....	177
Figure 94. Profil choisi par le groupe d'experts pour l'évaluation de la performance du barrage de Grengia (Italie) vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne – (photo : Bambara G., 2014) .....	178
Figure 95. Evaluation individuelle par les experts des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité du barrage de Grengia .....	180
Figure 96. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage de Grengia .....	180
Figure 97. Souche de conifère morte (a) et souche de chêne ayant rejeté (b) sur le couronnement aval du barrage de Grengia, Italie (photo : Bambara G., 2014) .....	181
Figure 98. Evaluation par le modèle de la performance de la fonction étanchéité du remblai avec et sans prise en compte de la végétation .....	182
Figure 99. Evaluation par le modèle de la performance des composants du barrage de Grengia vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne .....	182
Figure 100. Exemple de modélisation probabiliste de l'évaluation de la performance d'un tronçon de la digue de Veynes (05, France) vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne (Vuillet, 2012) .....	195
Figure 101. Représentation et propagation des données imparfaites dans le modèle d'évaluation de la performance des barrages en remblai (Curt, 2008) .....	196
Figure 102. Schéma de l'interféromètre de Michelson (Gaydou, 2010) .....	218
Figure 103. Résultats de l'évaluation qualitative de la décomposition des échantillons de racines issus du dispositif expérimental de Castérino (Echelle visuelle de 0 à 6 – Echelle de résistance de 0 à 4) .....	219
Figure 104. Evolution de la densité en fonction du stade de décomposition et des diamètres pour chaque espèce issue du dispositif expérimental de Castérino .....	220
Figure 105. Plan ½ de l'ACP de l'ensemble des échantillons du dispositif de Castérino (n=72 ; variance expliquée 84 %) – illustration de la séparation différents des stades de décomposition (T0, T2 et T4) .....	221
Figure 106. Plan ½ de l'ACP de l'ensemble des échantillons du dispositif de Castérino (n=72 ; variance expliquée 84 %) – illustration de la séparation espèces (M : mélèze et Ps : pin sylvestre) aux différents des stades de décomposition (T0, T2 et T4) .....	221
Figure 107. ACP à chaque temps de décomposition (a) plan ½ de l'ACP à T0 (n= 24 ; variance expliquée = 90 %), (b) plan ½ de l'ACP à T2 (n=24 ; variance expliquée = 93 %), (c) plan ½ de l'ACP à T4 (n=24 ; variance expliquée = 97 %) _ (M = mélèze ; Ps = pin sylvestre) .....	222
Figure 108. Localisation de la digue rive gauche du Petit Rhône, secteur du Mas de Cazeneuve (cercle rouge = localisation du tronçon de digue) .....	231
Figure 109. Coupe type de la digue rechargée dans le secteur de Trinquetaille Cazeneuve .....	231

Figure 110. Photo de la digue du Petit Rhône dans le secteur du Mas de Cazeneuve. Vue de la végétation arborescente côté eau que les utilisateurs des modèles sont en train d'évaluer ( <i>Photo : Curt C., 2015</i> ).....	232
Figure 111. Souche morte présente sur le tronçon du Mas de Cazeneuve ( <i>Photo : Bambara G., 2015</i> ).....	232
Figure 112. Localisation de la digue rive gauche du Petit Rhône, secteur du Bois de Beaumont (cercle rouge = localisation du tronçon de digue) .....	233
Figure 113. Photo de la digue rive gauche du Petit Rhône dans le secteur du Bois de Beaumont. Vue de la végétation arborescente présente en pied de digue côté zone protégée ( <i>Photo : Bambara G., 2015</i> ).....	233
Figure 114. Talus côté zone protégée et chêne mature pris en compte dans l'évaluation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente ( <i>Photo : Bambara G., 2015</i> ).....	234
Figure 115. Vue depuis la crête du barrage d'O... (Italie) ( <i>photo : Bambara G., 2014</i> ).....	235
Figure 116. Profil choisi par le groupe d'experts pour l'évaluation de la performance du barrage d'O... vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne ( <i>photo : Bambara G., 2014</i> ) .....	236
Figure 117. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage d'O.....	237
Figure 118. Evaluation de la performance du barrage d'O.....	238
Figure 119. Vue depuis la crête du barrage d'A... (Italie) ( <i>photo : Bambara G., 2014</i> ).....	239
Figure 120. Profil choisi par le groupe d'experts pour l'évaluation de la performance du barrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion (a : profil vu depuis la crête ; b : profil vu depuis le pied aval ; c : arbre mort sur le profil analysé) ( <i>photo : Bambara G., 2014</i> ).....	240
Figure 121. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage d'A.....	240
Figure 122. Evaluation de la performance du barrage d'A.....	241
Figure 123. Vue depuis la crête du barrage des G... (France – 05) ( <i>photo : Bambara G., 2014</i> ).....	242
Figure 124. Tapis drainant en pied aval du barrage des G... (France – 05) ( <i>photo : Bambara G., 2014</i> ).....	243
Figure 125. Profil choisi par le groupe d'experts pour l'évaluation de la performance du barrage des G... (France) vis-à-vis du mécanisme d'érosion ( <i>photo : Bambara G., 2014</i> ).....	244
Figure 126. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage des G.....	245
Figure 127. Evaluation de la performance du barrage des G.....	246
Figure 128. Vue de la retenue de P.. P.. depuis la crête (France – 05) ( <i>photo : Mériaux P., 2014</i> ) .....	247
Figure 129. Souches en décomposition sur le couronnement amont et sur la crête de la retenue de P..P.. (France – 05) ( <i>photo : Mériaux P., 2014</i> ).....	248
Figure 130. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage de P..P.....	249
Figure 131. Evaluation de la performance de la fonction étanchéité avec et sans prise en compte de la végétation arborescente .....	249
Figure 132. Vue du barrage des B... depuis l'amont (France – 05) ( <i>photo : Bambara G., 2014</i> ).....	250
Figure 133. Vue du talus aval et de la végétation arborescente en rive gauche du barrage des B... (France - 05) ( <i>photo : Bambara G., 2014</i> ) .....	250
Figure 134. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage des B.....	251
Figure 135. Evaluation de la performance du barrage des B.....	252
Figure 136. Vue du barrage des V... depuis la crête (France – 05) ( <i>photo : Bambara G., 2014</i> ).....	253
Figure 137. Souche de frêne ayant rejeté (a) et arbre mature sur tapis drainant (b) du barrage des V... (France – 05) ( <i>photo : Bambara G., 2014</i> ).....	254
Figure 138. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la végétation arborescente (notation consensuelle) du barrage des V... sur les deux profils.....	254

## Liste des tableaux

Tableau 1. Récapitulatif des différences et similitudes entre les systèmes de génie civil étudiés ..	31
Tableau 2. Tableau récapitulatif de l'influence des systèmes racinaires sur les quatre types de mécanismes d'érosion interne .....	45
Tableau 3. Extrait du tableau AMDE appliquée aux digues fluviale en remblai homogène (Vuillet, 2012).....	72
Tableau 4. Champs de la grille de formalisation des indicateurs d'état (Curt et al., 2001).....	73
Tableau 5. Echantillons de racines reliés aux souches issus de la campagne de déterrage sur les digues de l'Isère en aout 2013 .....	78
Tableau 6. Classe de décomposition des racines ligneuses à partir de critère visuels et tactiles (Sandström et al., 2007; Tobin et al., 2007).....	79
Tableau 7. Classe de décomposition des racines ligneuses à partir d'un critère de résistance à la pénétration d'un lame dans le bois (Renvall, 1995). .....	79
Tableau 8. Structure d'une matrice de données spectrales .....	84
Tableau 9. Extrait de la fiche de notation utilisée pour l'évaluation de la performance d'une digue de protection fluviale vis-à-vis du mécanisme de détérioration C1, EI (Ti = tronçon homogène, Ci, EI = critère fonctionnel relatif à l'érosion interne, IE = indicateur d'état) .....	92
Tableau 10. Test de Kruskal-Wallis sur les échantillons de chêne de diamètre 03 aux trois stades de décomposition T2, T4 et T6 (Sig. = Significatif) .....	100
Tableau 11. Synthèse des comparaisons par paires entre les rangs moyens des trois stades de décomposition T2, T4 et T6 (Intervalles de Bonferroni à 95, 0 % _ test de Kruskal-Wallis) pour l'analyse qualitative visuelle (A- représente T2, B – représente T4 et C- représente T6).....	100
Tableau 12. Synthèse des comparaisons par paires entre les rangs moyens des trois stades de décomposition T2, T4 et T6 (Intervalles de Bonferroni à 95, 0 % _ test de Kruskal-Wallis) pour l'analyse qualitative de résistance à la pénétration d'un couteau .....	101
Tableau 13 . Statistiques des modèles prédictifs (PLS-DA) pour la prédiction des classes de temps de décomposition.....	112
Tableau 14. Matrices de confusion des modèles prédictifs (PLS-DA) pour la prédiction des classes de temps de décomposition (n= 64).....	112
Tableau 15. Statistiques des modèles prédictifs (PLS-DA) pour la prédiction des classes « espèces ».....	113
Tableau 16. Matrices de confusion des modèles prédictifs de régression PLS-DA des classes d'espèces (n=64).....	113
Tableau 17. Statistiques des modèles prédictifs (PLS-DA) pour la prédiction des classes de décomposition des échantillons de racines issus de souches.....	114
Tableau 18. Prédiction des stades de décomposition des échantillons de racines issus de souches à partir des modèles prédictifs PLS-DA développés pour chaque classe de décomposition .....	114
Tableau 19. Extrait du tableau de synthèse de l'AMDE rassemblant les indicateurs associés à chaque fonction pour la partie N°1 « couronnement amont » d'un ouvrage hydraulique à charge temporaire ou à charge permanente.....	118
Tableau 20. Zone de l'ouvrage potentiellement évaluée par les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente .....	119
Tableau 21. Indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente identifiés pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire ou permanente selon le mécanisme de détérioration considéré .....	120
Tableau 22. Grille de formalisation pour l'indicateur d'état « <i>Densité des individus</i> » .....	121
Tableau 23. Indicateurs d'état relatifs aux différents critères fonctionnels nécessaires à l'évaluation de la performance d'une digue en remblai homogène vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne du fait de la présence de végétation arborescente.....	130
Tableau 24. Grille de formalisation pour l'indicateur d'état « <i>Géométrie du corps de digue</i> » ...	131
Tableau 25. Grille de formalisation de l'indicateur d'état direct « <i>Fuites, indices de fuites – corps de digue</i> » .....	131
Tableau 26. Résultats de l'évaluation de la performance des critères fonctionnels au tronçon N°1 par le groupe d'expertise et résultats obtenus au cours du projet Digsure (Vuillet, 2012) (C1, EI =	

perméabilité du corps de digue ; C2, EI = résistance à l'érosion interne du corps de digue ; C3, EI = Singularité du corps de digue).....	137
Tableau 27. Indicateurs d'état des différents critères fonctionnels nécessaires à l'évaluation de la performance d'une digue en remblai homogène vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement du fait de la présence de végétation arborescente .....	139
Tableau 28. Grille de formalisation de l'indicateur d'état IE1.1 « <i>Etat de la protection (Perré en pierre sèche)</i> ».....	140
Tableau 29. Synthèse des résultats des applications réalisées sur les tronçons de digue du petit Rhône. Evaluation de la performance par le modèle des critères fonctionnels et de l'indicateur de performance avec ou sans prise en compte de la végétation arborescente vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne.....	170
Tableau 30. Synthèse des résultats des applications réalisées sur les tronçons de digue du petit Rhône. Evaluation de la performance par le modèle des critères fonctionnels et de l'indicateur de performance avec ou sans prise en compte de la végétation arborescente vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement.....	170
Tableau 31. Indicateurs d'état de la fonction d'étanchéité pour les autres types de barrages étudiés .....	176
Tableau 32. Notation des indicateurs d'état pour l'évaluation de la performance du composant « remblai » du barrage de Grengia (NR : Non Renseigné) .....	179
Tableau 33. Synthèse des résultats d'évaluation de la performance des fonctions et du composant « remblai » des barrages avec ou sans prise en compte de la végétation arborescente .....	185
Tableau 34. Synthèse des résultats d'évaluation de la performance des fonctions et du composant « fondation » des barrages avec ou sans prise en compte de la végétation arborescente .....	186
Tableau 35. Synthèse des résultats d'évaluation de la performance des fonctions et du composant « interface remblai-fondation » des barrages avec ou sans prise en compte de la végétation arborescente.....	187
Tableau 36. Avantages et inconvénients des trois grandes approches de pronostic (Gucik-Derigny, 2011).....	197
Tableau 37. Statistiques des modèles prédictifs (PLS-DA) pour la prédiction des classes de temps de décomposition.....	223
Tableau 38. Matrices de confusion des modèles prédictifs de régression PLS-DA des classes de temps de décomposition (n=24) .....	223
Tableau 39. Statistiques des modèles prédictifs (PLS-DA) pour la prédiction des espèces .....	223
Tableau 40. Matrice de confusion du modèle prédictif de régression PLS-DA des espèces (n=24) .....	224
Tableau 41. Mise en évidence de la répétabilité de la méthode d'évaluation de la perte de densité par déplacement d'eau pour les échantillons de chêne à T0.....	225
Tableau 42. Tableau de synthèse de l'AMDE rassemblant les indicateurs associés à chaque fonction pour la partie N°2 « Couronnement aval » d'un ouvrage hydraulique à charge temporaire ou permanente .....	226
Tableau 43. Tableau de synthèse de l'AMDE rassemblant les indicateurs associés à chaque fonction pour la partie N°3 « Talus aval » d'un ouvrage hydraulique à charge temporaire ou permanente .....	227
Tableau 44. Tableau de synthèse de l'AMDE rassemblant les indicateurs associés à chaque fonction pour la partie N°4 « Pied aval » d'un ouvrage hydraulique à charge temporaire ou permanente .....	228
Tableau 45. Tableau de synthèse de l'AMDE rassemblant les indicateurs associés à chaque fonction pour la partie N°5 « Talus et pied de digue amont » d'un ouvrage hydraulique à charge temporaire.....	229
Tableau 46. Tableau de synthèse de l'AMDE rassemblant les indicateurs associés à la fonction évacuer les flux hydrauliques pour le dispositif de drainage d'un ouvrage hydraulique à charge permanente .....	230
Tableau 47. Notation des indicateurs d'état pour l'évaluation de la performance du composant « fondation » du barrage de Grengia (NR : Non Renseigné) .....	255

Tableau 48. Notation des indicateurs d'état pour l'évaluation de la performance du composant « interface remblai-fondation » du barrage de Grengia (NR : Non Renseigné).....	256
--	-----



## **Glossaire**

**AMDE (Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets) :** étude déductive et qualitative avec laquelle les effets (conséquences) des causes de défaillances des composants élémentaires sont systématiquement identifiées (Zwingelstein, 1995).

**Analyse fonctionnelle :** démarche qui consiste à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions d'un système (AFNOR, 1996).

**Brèche :** Ouverture à travers le corps de l'ouvrage hydraulique, d'un talus à l'autre. L'ouvrage ne remplit plus son rôle d'étanchéité. On parlera de brèche totale lorsque l'ouverture se généralisera sur toute la hauteur de l'ouvrage.

**Composant :** Élément matériel ou ensemble matériel remplissant une fonction particulière dans un système ou un sous-système (Zwingelstein, 1996).

**Défaillance :** cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. Par extension, on considère parfois qu'il y a une défaillance lorsqu'il y a altération de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise (Villemeur, 1988).

**Détérioration :** Etat dégradé ou comportement défectueux d'un ouvrage (ou composant) du point de vue de sa sécurité et de ses performances (ICOLD, 1983).

**Diagnostic :** identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test (AFNOR, CEI).

**Digue de protection contre les inondations :** digue dont au moins une partie est construite en élévation au-dessus du niveau du terrain naturel et destiné à contenir épisodiquement un flux d'eau afin de protéger des zones naturellement inondables (Mériaux et al., 2004).

**Enjeux :** personnes, biens, systèmes, ou autres éléments présents dans les zones de risque et qui sont ainsi soumis à des pertes potentielles.

**Expert :** personne disposant d'un savoir et d'un savoir-faire (Zwingelstein, 1995).

**Fonction :** Actions d'un produit ou de l'un de ses constituants exprimés exclusivement en terme de finalité (AFNOR, 1996).

**Indicateur // indicateur d'état :** information ou une donnée formalisée de manière à rendre son utilisation répétable et reproductible (Curt et al., 2010). Paramètre ou valeur calculée à partir de paramètres donnant des indications sur, ou décrivant l'état d'un phénomène, de l'environnement ou d'une zone géographique et d'une portée supérieure aux informations directement liées à la valeur d'un paramètre (OCDE, 1993).

**Indicateur de performance :** Information devant aider un acteur, individuel ou plus généralement collectif, à conduire le cours d'une action vers l'atteinte d'un objectif ou devant lui permettre d'en évaluer le résultat (Bonnefous, 2001).

**Mécanisme :** enchaînement de causes et de leurs effets (mécanisme de détérioration, mécanisme de rupture).

**Performance :** jugement, à un instant donné, de l'aptitude d'un ouvrage à remplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu. Par extension, on parle de performance d'une fonction pour indiquer l'état de réalisation de la fonction (Cremona, 2003).



**Pronostic** : le pronostic consiste à prédire l'évolution de l'état futur de santé d'un système et d'estimer le temps vie restant d'un système avant qu'une ou plusieurs défaillances n'apparaissent sur ce dernier (Goh et al., 2006).

**Rejet (des arbres)** : jeune pousse d'arbre provenant du recépage d'une souche (rejet de souche) ou d'une tige (rejet de tige).

**Répétabilité** : étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués dans la totalité des mêmes conditions de mesure (AFNOR, 1994).

**Reproductibilité** : Étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesure (AFNOR, 1994).

**Robustesse** : la robustesse est la capacité, pour une méthode, de donner des résultats proches en présence de faibles changements de conditions expérimentales susceptibles de se produire dans l'utilisation de la procédure.

**Sécurité** : aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques (Villemeur, 1988).

**Sûreté de Fonctionnement // sûreté de fonctionnement** : science des Défaillances, incluant leur connaissance, leur évaluation, leur prévision et leur maîtrise (Villemeur, 1988). La sûreté de fonctionnement est l'aptitude d'une entité à accomplir une ou plusieurs fonctions requises, dans des conditions données. La sûreté de fonctionnement est caractérisée par différents concepts, notamment la fiabilité et la durabilité (Villemeur, 1988).

**Système** : ensemble déterminé d'éléments discrets (ou composants) interconnectés ou en interaction (Villemeur, 1988).

**Tronçon de digue** : portion de digue qui présente une certaine homogénéité de conception (même type d'ouvrage, de matériaux, ...) ou de fonction (résistant à la surverse, déversoir, ...).

**Vulnérabilité (d'un ouvrage hydraulique)** : un jugement, à un instant donné, de la sensibilité d'un ouvrage hydraulique face à des phénomènes de dégradation (phénomènes de dégradation au sein de l'ouvrage ou causés par des événements extérieurs). Cette sensibilité peut entraîner l'incapacité totale ou partielle de l'ouvrage à remplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu.

# Introduction



Des centaines de milliers de barrages et de digues sont présents dans le monde, certains construits depuis plusieurs siècles. Le rôle de ces ouvrages de génie civil est essentiel. Les ouvrages hydrauliques à charge permanente (barrages et digues de canaux) peuvent remplir plusieurs fonctions : irrigation des cultures, stockage pour la distribution d'eau potable, loisirs, navigation, hydroélectricité... Les ouvrages hydrauliques à charge temporaire (digues fluviales de protection contre les inondations et aménagements écrêteurs de crue) permettent de protéger la population et ses biens en cas de crue.

La rupture de ces ouvrages peut avoir des conséquences économiques et humaines dramatiques : au niveau mondial, le nombre de rupture de grands barrages par an est en moyenne de 1 à 2 (Paquier and Robin, 1995). Par contre, le nombre de rupture de petits barrages est lui beaucoup plus important, au même titre que les digues de protection contre les inondations. La rupture de ces ouvrages de protection est d'autant plus traumatisante qu'ils sont censés protéger les populations contre les inondations. Les nombreux événements ayant eu des conséquences dramatiques ou économiques suite à la rupture ou à la défaillance d'ouvrages - les inondations de la Nouvelle Orléans aux USA lors de l'ouragan Katrina en 2005, dans l'Ouest de la France au cours de la tempête Xynthia en 2010 ou encore en 1993, 1994, 2002 et 2003 en Camargue et de 1999 et 2014 en Languedoc-Roussillon – témoignent de l'intérêt de lutter contre la vulnérabilité des ouvrages hydrauliques et d'améliorer leur sécurité.

La sécurité reste un terme très général : elle peut être classiquement définie comme l'état d'une situation présentant le minimum de risque. En Sûreté de fonctionnement, la sécurité est définie comme l'aptitude d'une entité de faire apparaître dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques (Villemeur, 1988). La sécurité repose donc sur la maîtrise des risques à un niveau acceptable (Zwingelstein, 1996). Ainsi la sécurité des ouvrages hydrauliques est le fait d'un ensemble d'acteurs : propriétaires, gestionnaires, bureaux d'études, services de contrôle, Etats. En France, la mise en œuvre de la réglementation de 2007 relative à la sécurité des ouvrages hydrauliques (décret du 11 décembre 2007 et arrêté du 12 juin 2008 concernant les études de dangers), ainsi que le nouveau décret 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, obligent ainsi les propriétaires d'environ 300 grands barrages de classe A et B, plusieurs milliers de petits barrages de classes C et D<sup>1</sup>, environ 5000 km de digues de canaux et près de 10 000 km de digues de protection fluviales à surveiller leurs ouvrages et à évaluer régulièrement leur niveau de sécurité.

Afin d'assurer une sécurité optimale des ouvrages hydrauliques, la maîtrise de leur vulnérabilité vis-à-vis des mécanismes de détérioration est donc une réelle préoccupation à laquelle sont confrontés leurs propriétaires et gestionnaires. Ces scénarios de défaillance peuvent correspondre à l'enchaînement d'un ou plusieurs mécanismes de détérioration tels que l'érosion interne, l'érosion externe, ou l'instabilité. Pour les ouvrages hydrauliques en remblai, sur lesquels nous travaillons, l'érosion interne est l'une des causes majeures de rupture (CFGB, 1997; Foster et al., 2000).

Vis-à-vis des trois mécanismes de détérioration possibles (érosion interne, érosion externe, instabilité), la vulnérabilité d'un ouvrage est due de manière générale au vieillissement naturel de l'ouvrage, de ses composants et matériaux, aux éventuels problèmes de conception-réalisation, à une maintenance déficiente ou irrégulière ou encore aux événements extérieurs (crues, séismes, erreurs d'opération). Elle peut entraîner l'incapacité totale ou partielle de l'ouvrage à remplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu. Cette vulnérabilité peut être reliée à des facteurs de fragilité interdépendants que nous regroupons en quatre catégories : **géométriques, géotechniques, hydrauliques et biologiques**. Par exemple, vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne ils sont détaillés comme suit :

- *géométriques* : la taille de l'ouvrage, ses pentes de talus, sa largeur ;

---

<sup>1</sup> Source : base de données SIOUH (Système d'Information des Ouvrages Hydrauliques), 2012

- *géotechniques* : le type de matériau de constitution, leur granulométrie, leur compactage... ;
- *hydrauliques* : la charge hydraulique que subit l'ouvrage a une influence directe sur les pressions interstitielles régnant dans le remblai et sur les gradients hydrauliques ;
- *biologiques* : la présence d'animaux fouisseurs (terriers) et de végétation ligneuse (densité, espèces, âge, ...).

Ces facteurs de fragilité spécifiques au mécanisme de détérioration par érosion interne, sont issus des facteurs liés au vieillissement naturel de l'ouvrage notamment vis-à-vis des facteurs géotechniques, aux problèmes de conception-réalisation (facteurs géométriques et géotechniques) et aux crues (facteurs hydrauliques), ainsi qu'à une maintenance irrégulière (facteurs biologiques – entretiens liés au développement de la végétation arborescente sur les ouvrages).

Ces facteurs de fragilité peuvent alors initier ou accroître un mécanisme de détérioration déjà en place au sein de l'ouvrage et ainsi dégrader son niveau de sécurité.

L'évaluation de la performance d'un ouvrage hydraulique est le processus qui consiste à évaluer à un instant donné son aptitude à remplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu : fonctions principales et fonctions techniques (assuré par ses composants). Ceci permet de juger de son niveau de sécurité. Ainsi, cette évaluation consiste à rechercher et évaluer l'ensemble des facteurs de fragilité qui contribuent à la réalisation des dégradations de l'ouvrage. In fine, cette évaluation permet aux gestionnaires d'ouvrages hydrauliques de prendre des décisions efficaces afin de réaliser en temps et en heure les travaux de maintenance nécessaires à la sécurité de leurs ouvrages.

Dans ce contexte, les gestionnaires en charge de la sécurité des ouvrages hydrauliques sont demandeurs de méthodes et outils leur permettant d'établir un diagnostic rapide ou détaillé de leur ouvrage. Le diagnostic reposant sur l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance (s) d'un ouvrage à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations, nous pouvons relier l'établissement d'un diagnostic à l'évaluation de la performance d'un ouvrage.

Des travaux de recherche antérieurs ont permis de développer des méthodes d'évaluation de la performance des digues fluviales et des barrages à l'aide de modèles à base de connaissances (Curt, 2008; Serre, 2005; Vuillet, 2012). Ils ont essentiellement abordé les facteurs « techniques » liés à l'ouvrage et ses composants (hydraulique, géotechnique, géométrique) et très partiellement les facteurs biologiques générés par la présence et l'action d'organismes vivants extérieurs. Cependant, un constat de présence très abondante de végétation arborescente peut être fait sur de nombreux ouvrages hydrauliques en remblai. Dans certains cas, les ouvrages hydrauliques en remblai tels que les digues de protection fluviales, les petits barrages collinaires et les digues de canaux ont été envahis naturellement par la végétation par manque d'entretien. Dans d'autres cas, des arbres ont été plantés en alignement sur les remblais ou à leur pied, dans un objectif de stabilisation, d'amélioration paysagère ou d'ombrage. Or, la présence de végétation arborescente sur ou aux abords de l'ouvrage pose de nombreux problèmes car elle peut favoriser l'apparition de mécanismes de détérioration à court, moyen et long termes (Mériaux et al., 2006). D'une part, la présence d'arbres favorise la concentration des écoulements en cas de crue et provoque des affouillements autour de la zone concernée. D'autre part, à la mort de l'arbre, la décomposition de son système racinaire favorise, selon la nature et la cohésion du sol, soit la création de conduits à travers le remblai, susceptibles d'initier une érosion interne de conduit, soit l'augmentation de la perméabilité globale dans la zone de remblai concernée, par la décomposition d'un volume racinaire important (Zanetti et al., 2008).

***L'objectif de la thèse est de fournir des méthodes et outils prenant en compte la présence de végétation arborescente sur ou aux abords des ouvrages hydrauliques. Elle répond à un besoin opérationnel essentiel des gestionnaires d'ouvrages hydrauliques en remblai visant à procéder à un diagnostic de l'ouvrage soumis à la présence de végétation. Ce diagnostic permettra d'établir par la suite un plan de gestion optimal de la végétation ligneuse qui priorisera les interventions de gestion sur les tronçons de digues ou les profils de barrages les plus vulnérables vis-à-vis de ce facteur.***

Notre travail s'inscrit clairement dans le cadre d'un environnement professionnel fort, à vocation de diagnostic et de suivi opérationnels des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente.

Notre rapport s'organise en cinq parties. Nous présentons dans une première partie la problématique posée par l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques soumis à la présence de végétation arborescente. Nous nous penchons tout d'abord sur la sécurité des ouvrages hydrauliques, puis sur l'influence que peut avoir la végétation ligneuse sur celle-ci. Nous amenons ainsi les questions scientifiques de ce travail et établissons les propositions pour conduire notre recherche.

Sur la base de ces propositions, la deuxième partie expose les méthodologies adoptées pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques soumis à la présence de la végétation arborescente.

La troisième partie est consacrée à la présentation des résultats.

Nous présentons, dans une quatrième partie, l'application des modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques boisés à des cas concrets. Nous cherchons ici à calibrer, valider et valoriser nos modèles d'évaluation.

Enfin, une cinquième partie permet de récapituler les apports méthodologiques et opérationnels de la thèse, puis de donner les perspectives de ce travail.



# Partie 1

## **Problématique posée par l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques soumis à la présence d'une végétation arborescente**

*Chapitre 1. Les ouvrages hydrauliques et leur sécurité*

*Chapitre 2. La végétation arborescente et la sécurité des ouvrages hydrauliques en remblai*

*Chapitre 3. L'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques*

*Chapitre 4. Synthèse de la problématique et questions scientifiques associées*





## Chapitre 1. Les ouvrages hydrauliques et leur sécurité

Dans ce chapitre, nous présentons les deux types d'ouvrages hydrauliques qui constituent l'objet de ces recherches. Nous explicitons ensuite brièvement les trois principaux mécanismes de détérioration pouvant mener à la rupture d'un ouvrage hydraulique et leurs interactions.

### 1. Les ouvrages hydrauliques en remblai à charge temporaire et permanente

Les ouvrages hydrauliques sont des systèmes de génie civil. Un système de génie civil se définit, d'une part à partir des éléments structurels (ou des sous-systèmes) qui le composent et d'autre part à partir des fonctions qu'il accomplit. A chaque niveau de décomposition du système, les éléments structurels remplissent des fonctions qui contribuent à la réalisation de la ou des fonctions principales de l'ouvrage que nous énonçons ci-dessous. Nous nous intéressons dans ce mémoire à deux types d'ouvrages hydrauliques en remblai : ceux à charge temporaire que sont les digues de protection contre les inondations fluviales et ceux à charge permanente que sont les digues de canaux et les barrages.

#### 1.1. Les ouvrages hydrauliques à charge temporaire

Les digues fluviales de protection contre les inondations sont des ouvrages généralement de grande longueur, construits dans le lit majeur des cours d'eau dont au moins une partie est construite en élévation au-dessus du niveau du terrain naturel. Ces ouvrages hydrauliques sont **destinés à contenir épisodiquement un flux d'eau afin de protéger des zones naturellement inondables** (Mériaux et al., 2004) : c'est la fonction principale de ces ouvrages.

La Figure 1 illustre la coupe type d'une vallée endiguée présentant, de part et d'autre du cours d'eau, des digues de protection.

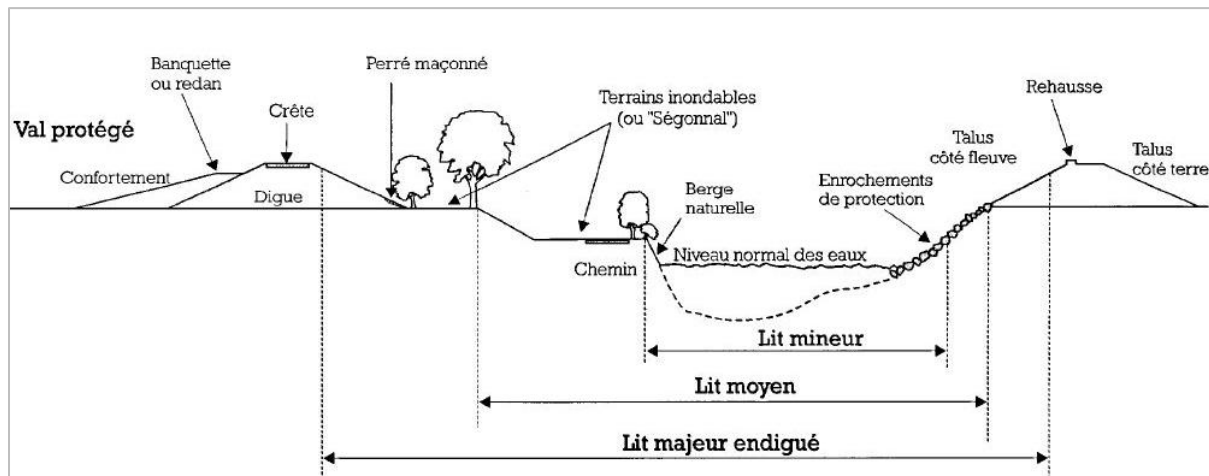
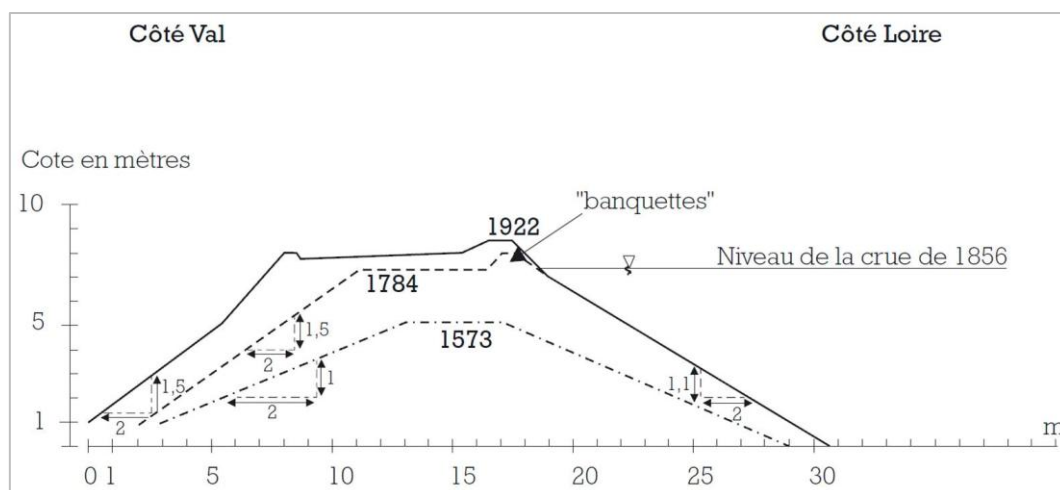


Figure 1. Coupe type d'une vallée endiguée (Mériaux et al., 2004)

Les digues de protection fluviale que nous étudions dans ce mémoire, sont des **digues en remblai dites homogènes**. Elles sont réputées construites avec un même matériau généralement pris sur place. Ces matériaux peuvent être fins ou grossiers, relativement homogènes dans leur ensemble ou très hétérogènes à une échelle plus fine. Ces ouvrages généralement anciens, ont souvent été construits en plusieurs étapes et rehaussés au cours du temps parfois avec des matériaux différents (cf. Figure 2).



**Figure 2. Coupe type d'une digue de la Loire représentative d'une digue historique ((Mériaux et al., 2004) d'après (Dion, 1961))**

L'une des caractéristiques principales de ces ouvrages hydrauliques est qu'ils sont la plupart du temps « à sec ». En effet, ils ne subissent une charge hydraulique que lors d'une crue. Ainsi, lors d'un diagnostic à un instant « t », l'évaluation de la performance de l'ouvrage doit s'effectuer en projetant, à la prochaine crue ou au prochain cycle d'évaluation<sup>2</sup>, les dégradations potentielles des fonctions du système de protection vis-à-vis des différents mécanismes de détérioration.

La seconde caractéristique des ouvrages hydrauliques à charge temporaire qu'il est important de souligner, est que ce sont des ouvrages à grand linéaire, au même titre que les réseaux routiers ou les réseaux d'alimentation en eau potable par exemple. L'évaluation de la performance de ces ouvrages à grand linéaire doit donc être réalisée en identifiant préalablement des tronçons homogènes de digue vis-à-vis des facteurs de fragilité spécifiques à chaque tronçon. La Figure 3 représente un exemple de tronçon de digue homogène qui avait été identifié préalablement à son diagnostic. Un tronçon est considéré comme homogène lorsqu'il présente des caractéristiques identiques tel que la géométrie, les caractéristiques géotechniques, la végétation, l'absence de point singulier (ouvrage traversant par exemple). Lorsque les évaluateurs considèrent un changement important du linéaire alors il détermine un nouveau tronçon homogène. Les points singuliers d'une digue font généralement l'objet d'une notation particulière.

<sup>2</sup> Soit 10 ans pour une évaluation détaillée réglementaire comprenant entre autres une étude de danger.



**Figure 3. Tronçon aux caractéristiques homogènes de la digue de protection fluviale en remblai à Beaucaire-Fourques (13) (photo : Bambara G., 2012)**

### *1.2. Les ouvrages hydrauliques à charge permanente*

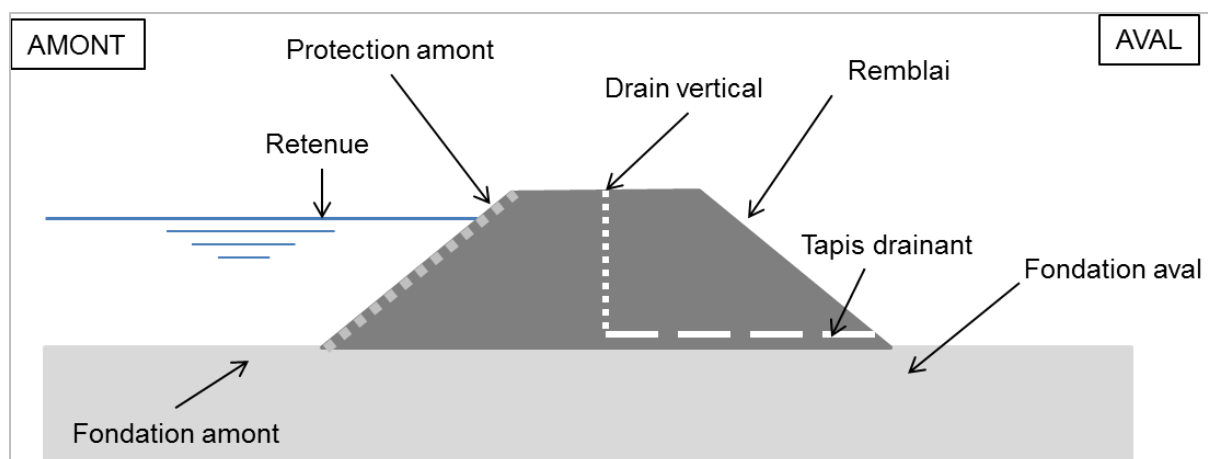
Les ouvrages hydrauliques à charge permanente, que sont les barrages et les digues de canaux, sont destinés à contenir les eaux de manière pérenne. Les barrages sont établis généralement en travers d'une vallée, barrant le lit mineur ou tout ou partie du lit majeur, parfois d'un replat transformant ainsi en réservoir un site naturel approprié<sup>3</sup>. Les digues de canaux sont des ouvrages situés latéralement le long de canaux, destinés à contenir et canaliser l'eau du canal. Ces ouvrages hydrauliques peuvent **remplir plusieurs fonctions principales : l'irrigation, l'alimentation en eau potable, les loisirs comme la pêche sportive ou encore la baignade, l'hydroélectricité.**

Les barrages qui intéressent plus spécifiquement ces travaux de thèse sont les petits barrages en remblai ayant une hauteur maximale avoisinant les 15 mètres. En effet, les grands barrages sont généralement bien entretenus et ne présentent que rarement de végétation arborescente indésirable sur le corps d'ouvrage ou à ses abords.

La Figure 4 présente une coupe simplifiée d'ouvrage hydraulique à charge permanente et ses principaux composants.

---

<sup>3</sup> On parle alors de retenue collinaire.



**Figure 4. Coupe type simplifiée d'un ouvrage hydraulique à charge permanente en remblai homogène**

Les petits barrages en remblai sont dans la plupart des cas construits en déblai-remblai et donc constitués des matériaux prélevés en place ou à proximité. Ils peuvent être équipés de dispositif de drainage, contrairement aux digues de protection fluviale qui ne possèdent pas ce type de dispositif.

La principale différence entre les barrages et les digues de canaux est que ces dernières, au même titre que les digues de protection fluviale contre les inondations, sont des ouvrages à grand linéaire. Un barrage est quant à lui un ouvrage plus ou moins court qui permet de stocker un certain volume d'eau.

Néanmoins, pour ces deux types d'ouvrages à charge permanente, les mécanismes de détérioration sont susceptibles de se produire en continu, étant donné que ce type d'ouvrage subit la charge de l'eau tout au long de sa vie. Ainsi, lors d'un diagnostic à un instant « t », nous pouvons observer directement les dégradations et / ou les défaillances des fonctions d'un ouvrage. Par exemple, la fonction drainage peut être dégradée du fait du colmatage des drains par les racines des arbres. Toutefois, à l'occasion des opérations ponctuelles de vidanges, des mécanismes de dégradation spécifiques peuvent apparaître tels que le glissement du parement amont.

### 1.3. Synthèse : les similitudes et différences entre les deux types ouvrages hydrauliques étudiés

Nous récapitulons dans le Tableau 1 les différences et similitudes existants entre les deux systèmes de génie civil que nous étudions dans ce mémoire.

**Tableau 1. Récapitulatif des différences et similitudes entre les systèmes de génie civil étudiés**

	Ouvrages hydrauliques charge permanente		Ouvrages hydrauliques à charge temporaire
	Barrages	Digues canaux	Digues fluviales
Sollicitation hydraulique	Continue		En cas de crue
Caractéristique géométrique	Ponctuel	Grand linéaire	
Dispositif de drainage	Fréquent	Assez fréquent	Absent
Instruments d'auscultation	Fréquent	Fréquent	Très rare sur les vieux ouvrages

Le diagnostic d'un ouvrage hydraulique à charge permanente et à charge temporaire ne s'aborde pas de la même manière : les défaillances peuvent être appréhendées au moment du diagnostic pour les ouvrages à charge permanente alors que pour les ouvrages hydrauliques à charge temporaire, il convient d'envisager les défaillances non pas à l'instant du diagnostic (lorsque l'ouvrage est à sec) mais en se projetant à la prochaine crue ou au prochain cycle d'évaluation. Nous sommes donc plutôt dans le cadre du pronostic. Les modèles d'évaluation de la performance développés devront prendre en compte cette différence. De plus, les ouvrages hydrauliques à charge permanente sont susceptibles de posséder des dispositifs de drainage et des instruments d'auscultation contrairement aux vieux ouvrages à charge temporaire auxquels nous nous intéressons. Les modèles doivent pouvoir s'adapter à la présence ou à l'absence de ces équipements et être utilisables malgré la diversité des cas rencontrés.

## **2. Les mécanismes de détérioration des ouvrages hydrauliques en remblai**

Les mécanismes de détérioration des ouvrages hydrauliques correspondent à l'effet des sollicitations qui leur sont appliquées et qui ont dépassé le seuil de résistance des matériaux constitutifs des ouvrages. Ces sollicitations pourront provoquer des mouvements, des déformations, des érosions sur ou dans un ouvrage ou sa fondation, ou encore des effets sur l'hydraulique interne. Mais les mécanismes de détérioration peuvent également résulter d'un vieillissement naturel ou prématuré dû à un mauvais entretien de l'ouvrage ou encore à une conception-réalisation incorrecte. Par exemple, un manque d'entretien vis-à-vis du développement de la végétation arborescente pourra entraîner la déstructuration des matériaux du remblai ; un mauvais compactage pourra quant à lui accroître la perméabilité du remblai.

Différents mécanismes de détérioration d'un ouvrage hydraulique peuvent avoir un impact significatif sur ses composants et ainsi conduire à une perte de fonction du composant et à une rupture de l'ouvrage plus ou moins directe. Ces mécanismes de détérioration sont complexes et peuvent se combiner entre eux. Par conséquent, une grande variété de scénarios de défaillance d'un ouvrage hydraulique peut être considérée (Sharp et al., 2013).

Trois grandes familles de mécanismes de détérioration des ouvrages sont actuellement considérés dans la littérature : l'érosion interne, l'érosion externe et les instabilités (Sharp et al., 2013). Nous définissons ci-dessous.

### **2.1. L'érosion interne**

L'érosion interne est un processus de dégradation nécessitant deux conditions :

- 1) le détachement de particules élémentaires d'un matériau ou de grains de sol qui constituent le remblai ou sa fondation ;
- 2) le transport sous l'effet d'un écoulement.

Elle recouvre l'ensemble des phénomènes d'arrachement puis d'entraînement des particules formant le corps d'un ouvrage en remblai, ou sa fondation, par les écoulements souterrains (en milieu poreux) qui s'y produisent.

Le phénomène d'érosion interne tend à se concentrer le long de chemins préférentiels de percolation des écoulements. Ces chemins préférentiels sont constitués par des fissures, des trous, de petites cavités, des zones de contact ou à l'interface remblai-fondation, des zones de plus grande perméabilité...

L'analyse d'un mécanisme d'érosion interne nécessite en premier lieu l'identification du « chemin d'érosion ». Dans un ouvrage, il peut bien entendu y avoir plusieurs chemins d'érosion.

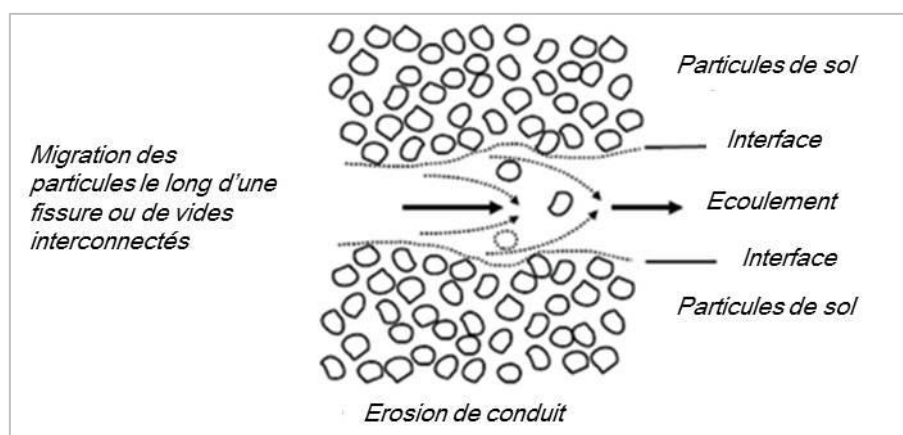
L'érosion interne est définie comme une érosion à l'intérieur d'un sol. Ce processus comprend quatre étapes :

- 1) l'initiation
- 2) la non-filtration
- 3) la progression
- 4) la brèche, totale ou partielle

Quatre mécanismes principaux sont distingués comme étant des phénomènes d'érosion interne (ICOLD, 2012) :

- l'érosion de conduit (ou érosion par écoulement concentré) ;
- l'érosion régressive ;
- l'érosion de contact ;
- la suffusion.

**L'érosion de conduit** est une érosion des particules tapissant les parois d'un conduit ou d'une série de cavités traversées par un écoulement préférentiel (cf. Figure 5). Elle se développe le long d'un défaut initial traversant en partie le remblai : défaut de type fissure, conduit préexistant ou ouvrage de génie civil traversant comme par exemple une conduite de vidange ou de prise d'eau. L'eau circulant dans ce conduit développe des contraintes d'entraînement suffisantes pour arracher et transporter les particules des parois. Ce type d'érosion se développe surtout dans les sols cohésifs, aptes à « supporter un toit » et à tenir le trou. Elle peut néanmoins se développer dans des matériaux hétérogènes, grossiers et mal compactés.



**Figure 5. Principe de l'érosion de conduit** (extrait de l'ILH (Sharp et al., 2013) d'après Rémi Béguin)

**L'érosion régressive** : son initiation est le départ de particules à l'exutoire aval d'un écoulement diffus. Les particules sont transportées vers l'aval de l'écoulement tandis que la surface d'érosion remonte vers l'amont (cf. Figure 6).

Les calculs montrent que l'initiation est inévitable, lorsque les deux conditions suivantes sont réunies :

- les écoulements diffus débouchent à l'aval, ou débouchent dans un milieu présentant des vides suffisants pour accueillir les particules érodées (rocher fissuré, alluvions grossières, ...) ;
- les matériaux sont pulvérulents (sans cohésion).

Les matériaux argileux cohésifs sont généralement peu sensibles à ce mécanisme : les forces causées par l'écoulement diffus en exutoire aval sont insuffisantes pour vaincre la cohésion.

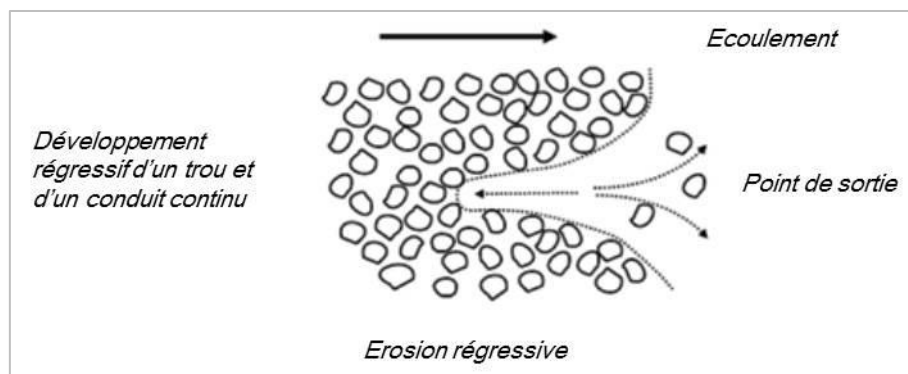


Figure 6. Principe de l'érosion régressive (extrait de l'ILH (Sharp et al., 2013) d'après Rémi Béguin)

**L'érosion de contact** est la forme d'érosion interne qui se développe à l'interface entre deux couches de sols différents, c'est-à-dire une érosion des particules d'un sol fin au contact d'un sol grossier, sous l'effet d'un écoulement perpendiculaire à cette interface par exemple dans le cas d'une remontée de nappe phréatique (cf. Figure 7). Dans cette forme d'érosion, les particules fines sont détachées et emportées à travers les pores et constrictions de la couche plus grossière.

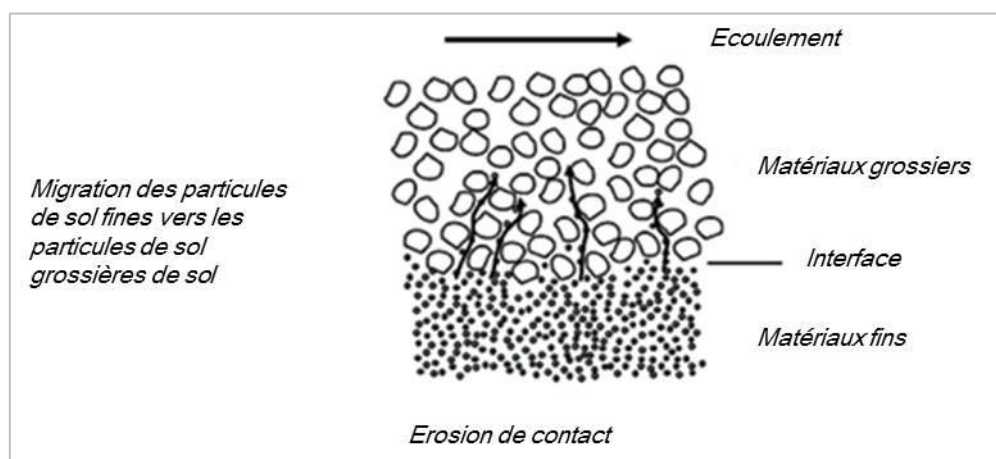


Figure 7. Principe de l'érosion de contact (Extrait de l'ILH (Sharp et al., 2013) d'après Rémi Béguin)

Cette forme d'érosion concerne :

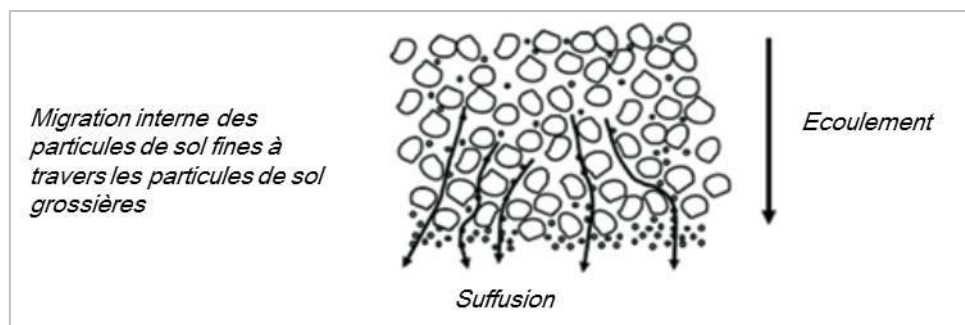
- la fondation des ouvrages, en particulier les fondations alluviales, où alternent des couches successives de sédiments d'origines diverses, formant de nombreuses interfaces entre matériaux de granulométries différentes ;
- l'interface entre les remblais fins et les zones de filtres ou drains trop grossiers.

Pour que l'érosion de contact apparaisse, on constate donc que deux conditions doivent être réunies :

- initiation : la contrainte hydraulique induite par l'écoulement doit être suffisante pour arracher les particules fines en contact avec la couche de sol grossier ;
- non-filtration : il faut que les pores du sol grossier permettent le passage des particules de sol fin au niveau de leurs constrictions : c'est une condition géométrique de filtre.

**L'érosion interne par suffusion** peut être définie comme une érosion sélective des particules fines d'un matériau à granulométrie hétérogène à travers les pores et constrictions formés par la matrice de particules plus grossières (cf. Figure 8).





**Figure 8. Principe de la suffusion** (extrait de l'ILH (Sharp et al., 2013) d'après Rémi Béguin)

L'érosion par suffusion est de même nature que l'érosion de contact, mais à l'intérieur d'un seul matériau à granulométrie hétérogène.

Pour qu'il y ait suffusion, il faut satisfaire à trois critères, pour partie analogues à ceux de l'érosion de contact :

- initiation de l'érosion par la liberté de mouvement des particules (absence de confinement) ;
- initiation de l'érosion par des vitesses suffisantes d'écoulement ;
- non-filtration : les particules fines doivent pouvoir se mouvoir dans les constriction (les pores) du matériau.

La progression nécessite également que les particules fines érodées trouvent un exutoire non filtré.

La suffusion est décelable dans le temps, car elle conduit à modifier lentement la structure et surtout la perméabilité des sols.

## 2.2. L'érosion externe

L'érosion externe est un processus d'érosion de surface de l'ouvrage sous l'effet d'une sollicitation extérieure telle que les actions hydrauliques (courants, tourbillons, vagues, écoulements de surface...), le vent, la végétation ligneuse lors d'un chablis ou encore l'activité animale et humaine. Cet entrainement des matériaux de surface a lieu lorsque les matériaux constitutifs de l'ouvrage ne sont pas suffisamment résistants pour faire face aux agressions issues de l'environnement, soit par le fait de leur vieillissement au cours de la vie de l'ouvrage, soit du fait d'une mauvaise conception-réalisation ou de l'apparition de conditions non prévues comme par exemple la présence de végétation arborescente lorsque l'entretien de l'ouvrage n'est pas réalisé.

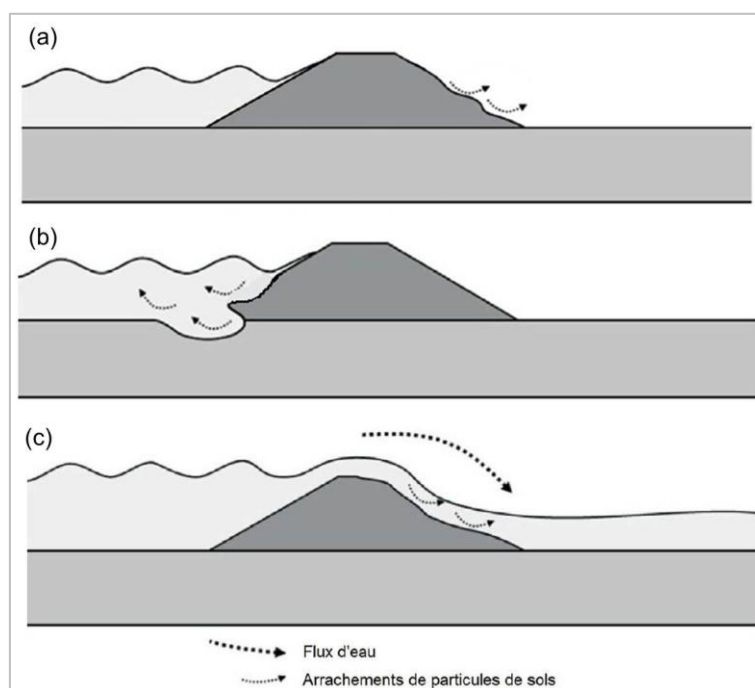
L'érosion externe agissant sur l'ensemble des talus induit une diminution de la largeur de l'ouvrage hydraulique et un raidissement des talus. Ces départs de matériaux peuvent notamment conduire à un creusement dénommé **affouillement**.

Trois types d'érosion externe (Sharp et al., 2013) peuvent être distingués et sont illustrés sur la Figure 9 :

- *l'érosion côté terre (ou val)* : elle se développe sous l'effet des sollicitations issues de la zone protégée ou aval, comme par exemple les agressions climatiques ou le passage d'engins motorisés, qui peuvent générer des départs de matériaux de surface et l'apparition d'instabilités de surface.
- *l'érosion externe côté retenue ou cours d'eau* : elle résulte plus particulièrement des sollicitations dues à l'effet des courants, des turbulences et des vagues mais peut également être induite par les agressions climatiques. L'érosion externe côté eau (amont) peut attaquer le corps de l'ouvrage comme sa fondation. Elle peut former soit des affouillements qui sapent la

base des ouvrages et créent des instabilités, soit le démantèlement du composant de protection puis du corps de l'ouvrage. Les dommages liés aux affouillements sont plus spécifiques aux ouvrages hydrauliques à charge temporaire, ils s'associent à l'évolution morphodynamique de la rivière dans lequel s'insère l'ouvrage. Mais pour les ouvrages hydrauliques à charge permanente, les dommages liés aux affouillements peuvent apparaître au niveau des évacuateurs de crue ou sous l'effet du batillage.

- *l'érosion externe par surverse* : la surverse est l'un des facteurs d'érosion externe les plus importants et les plus dévastateurs. Le débordement d'eau par-dessus la crête de l'ouvrage conduit à des écoulements à forte vitesse sur la crête et le parement aval. Ces écoulements génèrent une érosion régressive du talus pouvant rapidement conduire à une rupture de l'ouvrage.



**Figure 9.** Les différents types d'érosion externe (a) érosion externe côté terre (b) érosion externe côté eau (c) érosion externe par surverse (Deniaud Y., CETMEF – extrait de l'ILH (Sharp et al., 2013))

### 2.3. L'instabilité

Les instabilités sont issues de différents mécanismes (Sharp et al., 2013) :

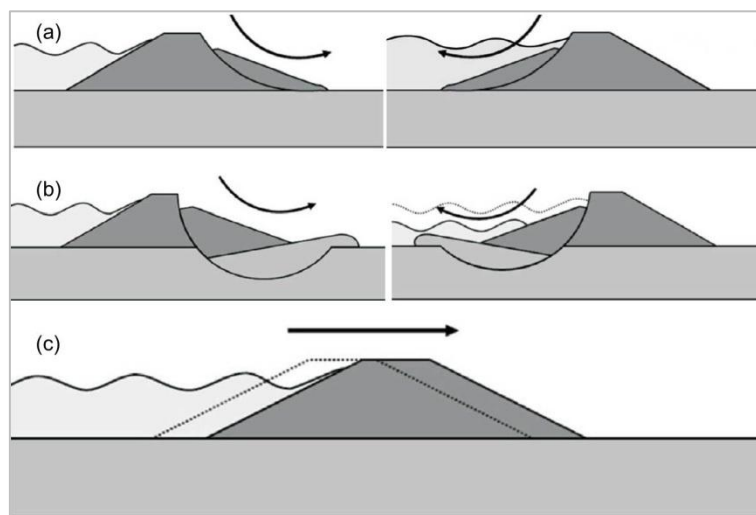
- glissement rotationnel ;
- glissement superficiel ;
- glissement translationnel ;
- tassements ;
- liquéfaction ;
- effondrements.

L'instabilité se produit lorsque les forces actives favorisant le mouvement des particules de sol dépassent les forces résistantes (Sharp et al., 2013). Les facteurs contribuant à ces instabilités sont :

- une conception et un dimensionnement ne respectant pas les règles de l'art géotechniques de construction des ouvrages en remblai ;
- le poids : chargement en crête ;

- la pression de l'eau ;
- le vieillissement et la détérioration des propriétés des matériaux constitutifs ;
- l'activité humaine ;
- l'activité animale ;
- le développement de la végétation arborescente ;
- les impacts lors d'une crue, les vibrations et éventuelles collisions ;
- une décrue rapide alors que le talus est saturé d'eau ;
- l'activité sismique.

La Figure 10 illustre les trois types de glissement pouvant affecter un ouvrage hydraulique en remblai.



**Figure 10. Les mécanismes d'instabilité côté eau et côté terre (a) glissement superficiel du corps de l'ouvrage, (b) glissement rotationnel du corps de l'ouvrage et sa fondation, (c) glissement translationnel du corps de l'ouvrage (Deniaud Y., CETMEF – extrait de (Sharp et al., 2013))**

#### 2.4. Bilan et couplage des mécanismes

Un ouvrage peut être touché par différents mécanismes aux causes multiples : l'érosion interne, l'érosion externe et les instabilités. Ces différents mécanismes peuvent se coupler ou s'enchaîner jusqu'à la rupture de l'ouvrage.

La rupture d'un barrage ou la brèche d'une digue de protection est rarement due à l'action d'une seule des trois familles de mécanismes présentés ci-dessus. Le couplage des mécanismes peut dans un premier temps intervenir au sein d'une même famille. Par exemple, un mécanisme de détérioration par érosion interne de conduit peut donner lieu à une érosion régressive qui accélèrera le mécanisme d'érosion interne pouvant donner lieu à une rupture de l'ouvrage.

Des mécanismes différents peuvent ensuite se combiner pour conduire à la rupture d'un ouvrage. Par exemple, pour une digue de protection contre les inondations, les mécanismes de détérioration par érosion externe peuvent être provoqués par les effets des courants qui entraînent une partie du matériau de la digue. Il en résulte un raidissement de la pente locale qui, associé à un affaiblissement des caractéristiques mécaniques du remblai favorise une instabilité par glissement du talus amont et un risque d'érosion interne du remblai érodé du fait de l'augmentation du gradient hydraulique.

## ***Chapitre 2. La végétation arborescente et la sécurité des ouvrages hydrauliques en remblai***

La présence de végétation arborescente sur ou aux abords des ouvrages hydrauliques en remblai est actuellement une préoccupation importante à laquelle sont confrontés de nombreux gestionnaires. En effet, le développement non maîtrisé de cette végétation, qui s'est fait de manière naturelle ou bien anthropique pour répondre à des besoins écologiques et paysagers, laisse à présent place à une végétation parfois très abondante, quelques fois même à une véritable forêt (cf. Figure 11).



**Figure 11. Digue en remblai de protection contre les inondations en Isère (38) soumise à la présence de végétation arborescente (photo : Bambara G.)**

Or, la végétation arborescente fait partie des facteurs de fragilité accélérant le vieillissement des ouvrages hydrauliques et pouvant être la cause initiatrice ou aggravante de mécanismes de détérioration. En effet, les grands systèmes racinaires déstructurent le remblai et peuvent laisser des vides lors de la mort des racines.

Actuellement, la doctrine de gestion des ouvrages hydrauliques en remblai est de ne pas laisser se développer de végétation arborée et de tendre uniquement vers un couvert herbacé, fauché régulièrement (Mériaux et al., 2004). La présence de végétation dense et non rase sur les ouvrages hydrauliques (digues et barrages) présente plusieurs inconvénients (FEMA, 2005; Laasonen, 2013; Martinez Santamaria and Fernandez Serrano, 2010; Mériaux et al., 2006) car elle :

- crée une gêne lors de l'examen visuel et l'entretien des ouvrages ;
- procure un couvert idéal pour l'installation des animaux fouisseurs, notamment pour les digues de protection qui, de par l'absence de charge hydraulique en dehors des périodes de crue, peuvent être attaquées sur les deux talus (côté eau et côté zone protégée) ;
- fragilise l'ouvrage par décompactage local du remblai ;
- crée des conduits lors de la décomposition des racines ;
- démantèle les structures en maçonneries ;
- colmate le système de drainage (si présent).

Ainsi, en France et à l'international, des recommandations ont été émises vis-à-vis de la présence de végétation arborescente sur certaines zones des ouvrages hydrauliques (crête, haut de talus, milieu de talus, pied de talus) (FLOODSAFE CALIFORNIA, 2012; Haselsteiner, 2010; Sharp et al., 2013; USACE, 2009; Vennetier et al., 2015; Zanetti et al., 2011). Cependant, les travaux de correction vis-à-vis d'une abondante végétation arborescente sur les ouvrages hydrauliques ont un coût élevé. Il n'est pas possible en effet de faire seulement une coupe des arbres. A leur mort les systèmes racinaires se décomposent et créent des hétérogénéités de perméabilité voire des conduits au sein du remblai ou de sa fondation. Il s'agit donc de dessoucher les arbres et de reconstituer ensuite l'ouvrage en réalisant des travaux de confortement des talus. Pour les gestionnaires, échelonner ces travaux dans le temps en priorisant les actions à mener en fonction du risque encouru pour la sécurité de l'ouvrage est un enjeu important. Depuis une vingtaine d'années, de nombreuses recherches dans différents pays (France, Etat Unis, Allemagne, Japon...) ont donc été engagées pour étudier et mieux caractériser les effets de la végétation arborescente sur la sécurité des ouvrages hydrauliques : développement des arbres, rôles vis-à-vis de la stabilité de l'ouvrage, vis-à-vis de l'érosion, sur les technologies d'investigation possibles pour la détection des systèmes racinaires... L'ensemble de ces travaux ont été répertoriés dans un ouvrage rédigé par l'USACE (Corcoran et al., 2010).

Dans cet ouvrage, nous constatons que des manques existent en termes de recherche sur les thématiques liées à l'impact de la présence de végétation arborescente sur les ouvrages hydrauliques. Ainsi, l'influence précise de la végétation arborescente sur les mécanismes de détérioration des ouvrages n'est pas réellement connue. Certains aspects liés à la présence de végétation apparaissent positifs comme l'augmentation de la résistance à l'érosion de surface ou l'augmentation de la cohésion effective par le renforcement des talus due au système racinaire. Cependant l'impact lié à la structure des systèmes racinaires et à leur vitesse de décomposition vis-à-vis des mécanismes de détérioration des ouvrages est encore mal connu. Les techniques de recherches sont encore destructives : dessouchement des arbres pour l'étude de la structure de leurs systèmes racinaires ou pour l'appréciation de l'état de décomposition des racines. Sur les 200 documents répertoriés, aucun modèle ne permet d'appréhender la vitesse de décomposition d'un système racinaire.

En France, les travaux de thèse de Zanetti (2010) ont consisté à réaliser une étude globale visant à caractériser le développement des systèmes racinaires ligneux dans les ouvrages hydrauliques en remblai. Cinq axes de recherche ont été menés en parallèle : l'étude de la structure des systèmes racinaires, leur architecture, leur croissance, leur vitesse de décomposition, leur détection.

Les résultats obtenus pour les trois premiers axes ont permis de caractériser le développement de la végétation arborescente et notamment des systèmes racinaires. Les deux derniers axes ont été menés à titre exploratoire, avec notamment la mise en place de dispositifs expérimentaux pour l'étude de la vitesse de décomposition des racines ligneuses. Ces axes de recherches sont actuellement en cours d'approfondissement.

La problématique liée à la décomposition des racines ligneuses dans les ouvrages hydrauliques est poursuivie dans les présents travaux ainsi que celle liée à la détection des systèmes racinaires qui fait également l'objet de travaux de thèse en cours (Mary et al., 2015, 2013).

Le diagnostic puis le pronostic d'un ouvrage hydraulique en remblai soumis à la présence de végétation arborescente vis-à-vis des différents mécanismes de détérioration potentiels, est donc important à réaliser. Cette démarche permettra d'établir des recommandations de gestion de la végétation dans le temps afin d'échelonner les coûts des travaux de réhabilitation de l'ouvrage tout en maintenant un niveau de sécurité satisfaisant.

Ce chapitre présente dans un premier temps la sélection des mécanismes de détérioration auxquels nous nous intéressons dans la suite du mémoire. Les différents types de structure racinaire des arbres sont ensuite présentés. En effet, selon le type de structure racinaire de la végétation présente sur ou aux abords d'un ouvrage, les mécanismes de détérioration susceptibles de se produire ne seront pas les mêmes. L'influence de la végétation arborescente vis-à-vis des mécanismes de détérioration des ouvrages est alors abordée. Une réflexion est faite autour des mécanismes pouvant potentiellement être induits ou aggravés par la présence de végétation arborescente. D'autre part, la décomposition des

racines ligneuses étant reconnue dans le domaine de la sécurité des ouvrages comme un phénomène particulièrement indésirable (Zanetti et al., 2013) notamment lorsque cette décomposition a atteint un certain seuil, nous nous attachons à établir un état de l'art sur les différentes méthodes permettant de caractériser la décomposition des racines ligneuses. Enfin, nous énonçons le choix des méthodes que nous avons retenues pour estimer l'état de décomposition des racines ligneuses.

## ***1. Influence de la végétation arborescente sur les mécanismes de détérioration des ouvrages hydrauliques***

### ***1.1. Mécanismes de détérioration concernés***

Les principaux mécanismes de détérioration ont été présentés (partie 1, chap.1, section2) ainsi que leurs combinaisons potentielles correspondant aux différents scénarios pouvant mener jusqu'à la rupture de l'ouvrage. La végétation arborescente peut potentiellement initier ou aggraver deux mécanismes de détérioration : ***l'érosion interne et l'érosion externe.***

Comme défini précédemment, ***l'érosion interne*** nécessite la présence de « défauts » (fissures, trous, cavités, zones de plus grandes perméabilité...) qui constitueront un ou des chemins préférentiels d'écoulement au sein de l'ouvrage. **Or la présence de végétation arborescente et plus spécifiquement de son système racinaire est typiquement un exemple de défaut au sein de l'ouvrage.**

La présence de végétation arborescente peut s'avérer défavorable pour ces trois types d'érosion externe : le déracinement d'un arbre par le vent ou le courant peut aggraver l'érosion externe côté terre ou l'érosion externe par surverse. **Dans cette thèse, nous traiterons uniquement le mécanisme d'érosion externe par affouillement.**

Parmi les différents types d'instabilités, tous ne sont pas des mécanismes pouvant résulter directement de l'influence de la végétation arborescente comme par exemple la liquéfaction. Par contre, le poids des arbres et leur sollicitation par le vent ou le courant peut entraîner des instabilités de type glissement. De même, une instabilité peut intervenir suite à une érosion externe ou une érosion interne qui sera potentiellement liée à la présence d'arbres. Ce mécanisme n'a cependant pas été traité dans le cadre de cette thèse.

Dans la suite de ce mémoire nous traitons le mécanisme de détérioration par érosion interne résultant de la présence de végétation arborescente dans les deux types d'ouvrages hydrauliques en remblai étudiés. Le mécanisme d'érosion externe par affouillement n'est traité quant à lui que dans le cadre des ouvrages hydrauliques à charge temporaire, puisque plus pertinent pour ce cas. Avant d'analyser les interactions entre la végétation arborescente et ces deux mécanismes de détérioration, nous définissons les différents types de structures racinaires que peut adopter un arbre mature.

### ***1.2. Définition des différents types de structure racinaire***

Le type de structure racinaire est considéré dans la littérature comme un compromis entre un héritage génétique et une plasticité en fonction des conditions de l'environnement local de l'arbre (Köstler et al., 1968). Les récentes recherches de Zanetti et al (2015) et Vennetier et al (2015) ont permis de démontrer qu'en fonction du type de sol, de l'accessibilité à l'eau et aux nutriments, ce dernier peut adopter un type de structure racinaire différent dans les ouvrages hydrauliques. La plasticité en fonction des conditions environnementales locales a donc un rôle prépondérant dans la détermination du type de structure racinaire d'une espèce ligneuse.

Dans la littérature quatre types de structure des systèmes racinaires ont été identifiés et classifiés (Foussadier, 2003; Zanetti et al., 2008) :



- **une structure de type traçant.** Ces systèmes présentent de longues racines horizontales proches de la surface du sol, susceptibles de traverser l'ouvrage d'amont en aval ou inversement ;
- **une structure de type pivotant,** composée majoritairement de grosses racines verticales qui peuvent pénétrer profondément dans le remblai ;
- **une structure de type mixte,** c'est-à-dire regroupant des racines traçantes et pivotantes ;
- **une structure de type fasciculé** qui présente de nombreuses racines dans toutes les directions de l'horizontale à la verticale, généralement de faibles diamètres.

La Figure 12 illustre ces quatre types de structure des systèmes racinaires :

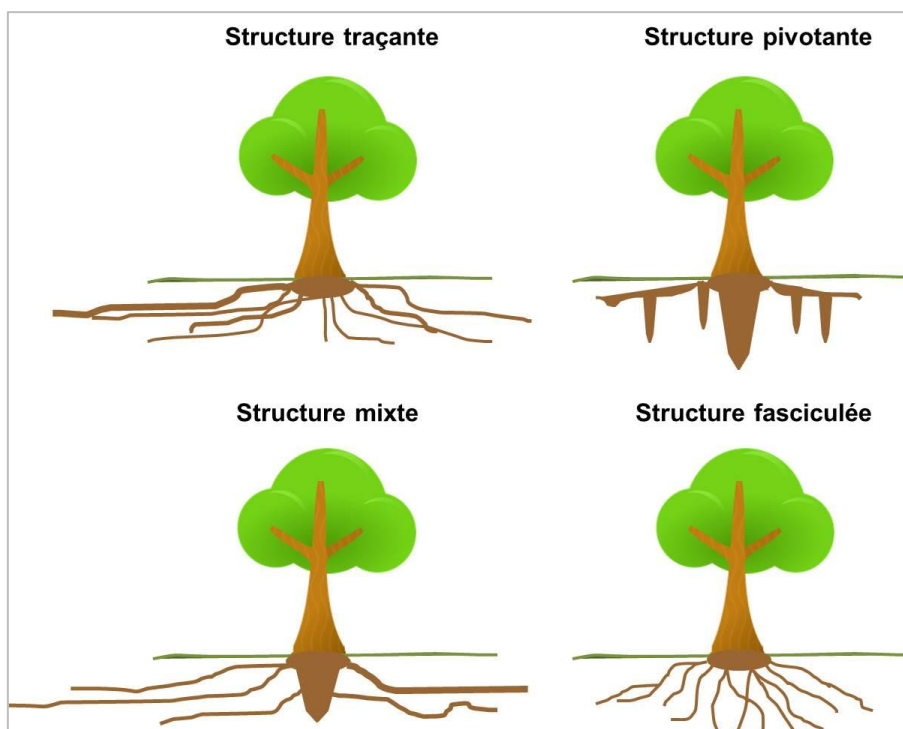


Figure 12. Les quatre types de structure racinaire d'un arbre

Pour notre étude, nous regroupons d'une part les systèmes racinaires traçants et mixtes qui sont tous deux susceptibles de traverser l'ouvrage de part en part avec leurs racines horizontales. D'autre part, nous regroupons les systèmes racinaires pivotants et fasciculés, de par leurs facultés à rester dans une zone proche du tronc de l'arbre.

*A noter que les risques engendrés par la présence de la végétation arborée et de leur système racinaire sur les ouvrages hydrauliques dépendent également du type de matériaux constitutifs de l'ouvrage et de sa géométrie (Zanetti, 2010).*

### 1.3. La végétation arborescente et l'érosion interne

Nous analysons ci-dessous l'influence de la présence de systèmes racinaires sur les quatre types d'érosion interne (partie 1, chap.1, section 2.1) et nous proposons des hypothèses quant à l'influence *initiatrice* ou *aggravante* de la végétation sur le mécanisme considéré.

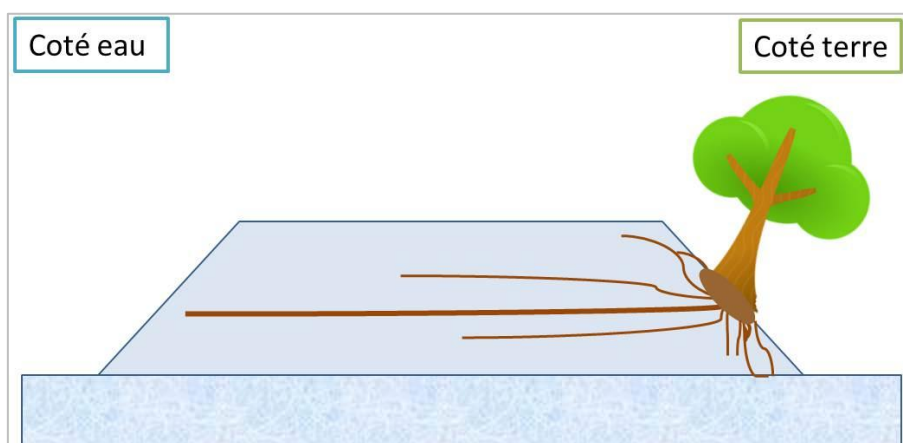
#### 1.3.1. Les systèmes racinaires et le mécanisme d'érosion interne de conduit

Lors de la décomposition de racines ligneuses au sein d'un ouvrage constitué de matériaux plutôt cohésifs, des vides, voire des conduits, peuvent être générés (cf. Figure 13).



**Figure 13. Exemple de conduit laissé par une grosse racine ligneuse après sa décomposition sur un ouvrage (photo : Zanetti, C.)**

Sachant que l'érosion de conduit est entièrement pilotée par les hétérogénéités et défauts au sein de l'ouvrage (Deroo and Fry, 2014), nous pouvons supposer que ce type de mécanisme d'érosion interne puisse se mettre en place à cause de fuites le long de conduits produits par la décomposition de racines ligneuses, après la mort d'un arbre. Le conduit laissé par la décomposition de grosses racines ligneuses traversant le remblai est ainsi considéré comme un défaut ou une hétérogénéité du remblai pouvant *initier* un mécanisme d'érosion interne de conduit (ou d'érosion interne par écoulement concentré). Ce défaut doit être traversant (d'amont en aval), ou quasi traversant, pour que les gradients d'écoulement puissent vaincre la section résiduelle, par déboufrage ou par érosion régressive. Nous nous intéressons donc dans ce cas aux racines ligneuses susceptibles de traverser l'ouvrage : type traçant ou mixte ou type fasciculé susceptible d'avoir des racines qui traverse l'ouvrage notamment dans le cas d'un ouvrage étroit. La Figure 14 illustre ce type de structure racinaire.



**Figure 14. Illustration d'un arbre ayant une structure racinaire traçante, mixte ou fasciculé possédant une racine ou plusieurs racines traversant le remblai et pouvant induire un mécanisme de détérioration par érosion interne de conduit lors de la décomposition de ses racines ligneuses**

Le type de structure racinaire et le degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu couplés à la potentialité d'érodabilité du sol en place peut nous permettre d'appréhender la potentielle *initiation* d'un mécanisme d'érosion interne de conduit. La localisation de la racine ligneuse traversante de son vivant, puis à la suite de sa décomposition totale permettra d'identifier le chemin d'érosion (Mary et al., 2013).



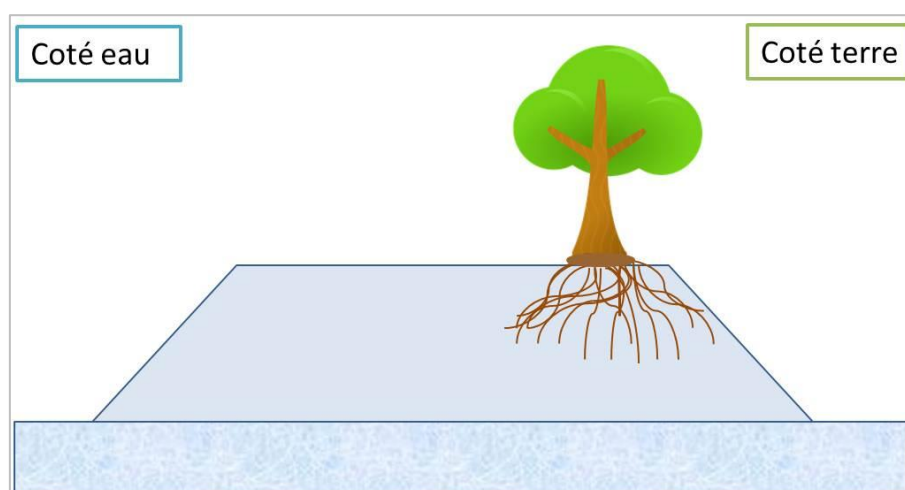
A noter également que, si la décomposition de racines s'est développée le long d'ouvrages traversant, cela constitue un risque d'aggravation du mécanisme d'érosion de conduit. En effet, ce mécanisme a tendance à s'initier dans cette zone de plus grande perméabilité.

### 1.3.2. Les systèmes racinaires et le mécanisme d'érosion interne par érosion régressive

L'hypothèse que l'érosion régressive puisse être initiée par la présence de systèmes racinaires en décomposition est plausible. Dans certaines conditions, des vides laissés par des racines décomposées (même dans un sol pulvérulent) pourraient recevoir les particules érodées par l'érosion régressive, initiant ou aggravant alors le mécanisme qui pourrait ensuite se coupler à un mécanisme d'érosion de conduit. La décomposition des systèmes racinaires jouerait ici le rôle d'un **facteur aggravant** le mécanisme d'érosion interne. De plus, nous pouvons supposer que la décomposition des racines pourrait conduire à des zones d'écoulements diffus susceptibles de déboucher à l'aval ou dans un vide. Dans ce cas, la décomposition des systèmes racinaires jouerait alors un rôle **initiateur** du mécanisme.

### 1.3.3. Les systèmes racinaires et le mécanisme d'érosion interne par suffusion

Dans un matériau hétérogène en terme de granulométrie, nous pouvons émettre l'hypothèse que la croissance puis la décomposition quasi continue des petites racines des systèmes racinaires (et de nombreuses petites racines dans le cas des systèmes racinaires fasciculés) accroît le nombre de pores et la perméabilité du matériau et donc la capacité de mouvance des particules fines. La Figure 15 illustre ce type de système racinaire.



**Figure 15. Illustration d'un arbre ayant une structure racinaire de type fasciculé avec un nombre important de petites racines pouvant induire un mécanisme de détérioration d'érosion interne par suffusion**

De même cette décomposition des systèmes racinaires, qu'elle se produise à la mort d'un arbre ou de son vivant, pourrait modifier la perméabilité intrinsèque du remblai par augmentation du nombre de pores. Le processus d'initiation puis la progression d'une érosion interne par suffusion pourrait être accéléré. La présence de systèmes racinaires sur les ouvrages hydrauliques en remblai est donc un **facteur aggravant** dans le processus du mécanisme de détérioration par suffusion mais ne constitue en rien une amorce du phénomène à la différence du mécanisme de détérioration par érosion de conduit.

### 1.3.4. Les systèmes racinaires et le mécanisme d'érosion interne par érosion de contact

L'interface remblai-fondation est une zone potentiellement sensible au mécanisme de détérioration par érosion interne de contact si la différence de granulométrie entre les matériaux des deux composants (remblai – fondation) s'y prête. Les circulations d'eau sont généralement favorisées au niveau de ces interfaces, plus perméables. Nous émettons l'hypothèse que la présence de racines

ligneuses augmente cette sensibilité par le fait que la décomposition des racines se trouvant au niveau de ces zones d'interface peut accroître la perméabilité de cette zone. La présence de racines ligneuses à l'interface remblai-fondation d'un ouvrage hydraulique serait alors un facteur **aggravant** le mécanisme d'érosion de contact. D'autant plus que le développement de racines ligneuses a pu être observé au niveau de la zone d'interface remblai-fondation : c'est parfois une zone humifère favorable à la croissance des racines si le sol n'a pas été décapé profondément avant la construction, (cf. Figure 16). C'est aussi une zone favorable aux racines qui recherchent de l'eau dans les milieux secs, l'épaisseur de la digue protégeant les fondations du dessèchement.



**Figure 16. Développement de racines à l'interface du remblai-fondation du canal de Cuxac favorables à une érosion de contact (photo : Mériaux P.)**

De plus, les racines des arbres, qui laissent potentiellement des vides ou des conduits à leur mort, serait également un **facteur initiateur** d'un mécanisme d'érosion interne de conduit sur cette zone d'interface entre le remblai et la fondation. Deux mécanismes d'érosion interne pourraient alors être couplés.

### 1.3.5. Synthèse

Sur la base des constatations de terrain vis-à-vis des conséquences de la décomposition des racines ligneuses au sein des ouvrages hydrauliques (cf. Figure 13), ainsi que de la connaissance acquise sur les quatre types de mécanisme d'érosion interne, nous émettons certaines hypothèses quant à l'influence de la végétation arborescente sur le mécanisme de détérioration par érosion interne. Deux types de facteurs d'influence liés à la décomposition des racines ligneuses peuvent être envisagés :

- Un **facteur initiateur** d'un mécanisme d'érosion interne ;
- Un **facteur aggravant** d'un mécanisme d'érosion interne déjà en place.

Nous récapitulons dans le Tableau 2 le type de facteurs d'influence des systèmes racinaires auquel est associé chaque mécanisme d'érosion interne.

**Tableau 2. Tableau récapitulatif de l'influence des systèmes racinaires sur les quatre types de mécanismes d'érosion interne**

<b>Influence de la végétation arborescente sur le mécanisme de détérioration par érosion interne</b>		
	<i>Facteur initiateur</i>	<i>Facteur aggravant</i>
<b>Erosion de conduit</b>	<b>✗</b>	<b>✗</b>
<b>Erosion régressive</b>	<b>✗</b>	<b>✗</b>
<b>Erosion par suffusion</b>		<b>✗</b>
<b>Erosion de contact</b>		<b>✗</b>

Ces éléments justifient qu'il n'est pas envisageable de gérer la végétation arborescente présente sur les ouvrages hydrauliques en effectuant de simples coupes. De fait, la décomposition des racines ligneuses pourrait initier ou aggraver un mécanisme de détérioration par érosion interne. L'estimation de la vitesse de décomposition des racines s'avère être un enjeu important à connaître afin de prioriser les actions de dessouchage au cours du temps et éviter la mise en place ou l'aggravation du mécanisme au sein d'un ouvrage.

#### *1.4. La végétation arborescente et l'affouillement*

Le mécanisme de détérioration par affouillement est une forme d'érosion externe côté cours d'eau. Ce mécanisme de détérioration concerne plus spécifiquement les ouvrages hydrauliques de protection contre les crues qui sont soumis plus brutalement aux évolutions morphologiques des cours d'eau. Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons donc plus particulièrement à l'influence de la végétation arborescente sur *l'initiation et l'aggravation* du mécanisme de détérioration par affouillement des digues de protection contre les crues.

La présence de végétation arborescente en pied ou sur le talus côté amont d'un ouvrage peut créer des affouillements dus aux courants tourbillonnaires autour du tronc des arbres. Ces courants tourbillonnaires peuvent déstabiliser l'arbre, qui emportera avec lui une partie plus ou moins importante de la protection du corps de l'ouvrage si elle est présente et de ses matériaux constitutifs. Ce phénomène engendre alors une aggravation importante du mécanisme de détérioration par affouillement de l'ouvrage hydraulique. La Figure 17 illustre un cas d'affouillement en pied d'ouvrage suite à la chute d'un arbre.



**Figure 17. Affouillement du pied d'une digue par les courants tourbillonnaires derrière un arbre tombé**  
(photo : Zanetti C.)

La présence de végétation arborescente sur les ouvrages hydrauliques en remblai peut également influencer ou aggraver d'autres mécanismes d'érosion externe tels que celle par surverse dans le cas où un arbre situé en crête ou sur le talus côté aval de l'ouvrage favoriserait des érosions locales autour de la base du tronc. Nous ne traiterons cependant dans ce mémoire que l'influence de la végétation arborescente sur le mécanisme de détérioration par affouillement du talus côté cours d'eau.

La gestion de la végétation arborescente vis-à-vis de ce mécanisme ne peut pas non plus se résumer à une simple coupe des arbres car il en résulterait une initiation ou une aggravation du mécanisme de détérioration par érosion interne.

## ***2. Approches pour la caractérisation de la décomposition des racines ligneuses***

L'influence de la décomposition des racines ligneuses sur l'initiation du mécanisme de détérioration par érosion interne étant non négligeable, il apparaît nécessaire de pouvoir appréhender les vitesses de décomposition des systèmes racinaires suite à l'abattage ou à la mort naturelle des arbres. En effet, cette connaissance permettra aux gestionnaires de connaître le délai dont ils disposent entre l'abattage et le dessouchage d'arbres et la disparition des racines ligneuses par décomposition, laissant autant de conduits dangereux dans l'ouvrage.

La décomposition de la matière organique est un processus naturel et fondamental dans le cycle biogéochimique d'un écosystème (Berg, 1984; Manlay et al., 2004; Mao et al., 2011; Olajuyigbe et al., 2012; Shorohova et al., 2008). Les études sur la décomposition racinaire ne sont pas nombreuses et la plupart d'entre elles s'intéressent à la production de biomasse des forêts ou des relations entre les flux de carbone et d'azote résultant de la décomposition du bois mort dans le sol (Vogt et al., 1986). Plusieurs études traitent de la décomposition de la litière des feuilles (Olson, 1963) ou de la litière des racines (Berg, 1984) dans les dix premiers centimètres de la surface du sol. Cependant, les mécanismes qui régissent la décomposition de la matière organique à une profondeur plus élevée diffèrent de ceux de surface du fait de champignons, insectes et microorganismes différents, propriétés chimiques du sol différentes, conditions environnementales (température, humidité)... Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéressons à ce type de dégradation. Les racines ligneuses susceptibles d'être dangereuses pour les ouvrages hydrauliques peuvent se trouver dans le corps du remblai ou dans

la fondation (si les arbres sont positionnés en pied d'ouvrage). De manière générale, nous les situons autour d'une moyenne de cinquante centimètres de profondeur.

Devant l'importance que revêt le processus de décomposition des systèmes racinaires, certains scientifiques se sont attachés à identifier les facteurs de régulation (comme la température, l'humidité, la qualité du bois racinaire, la présence d'agent de décomposition tel que les champignons...) qui influent sur la vitesse de décomposition des racines (Berg et al., 1998; Chen et al., 2001, 2000; Hood et al., 2011; Manlay et al., 2004; Silver and Miya, 2001). Cependant, les études permettant d'évaluer le taux de décomposition des racines ligneuses dans le sol sont rares. Cette rareté est notamment due à la difficulté technique d'étude de ce processus « sous-terrain » (Chen et al., 2001). Le taux de décomposition des racines au cours du temps est habituellement appréhendé à l'aide de modèles d'ajustement linéaire ou de tendance exponentielle (Aber et al., 1990; Gijsman et al., 1997; Scheu and Schauer mann, 1994). Mais le processus de décomposition des racines comprend deux phases qui doivent être incluses dans les modèles (McClaugherty et al., 1984; Silver and Miya, 2001). La première phase est caractérisée par une perte rapide de masse qui est due principalement à l'élimination des éléments chimiques inorganiques et du carbone soluble dans l'eau par les microorganismes et le lessivage. La seconde phase est caractérisée par une perte de masse plus lente, régulée par la résistance à la dégradation de la lignine et des autres composés récalcitrants. Les facteurs de régulation du taux de décomposition des racines sont avant tout leurs caractéristiques spécifiques : l'espèce d'arbre, le diamètre des racines et les proportions des composés chimiques (Berg, 1984).

Le suivi et la caractérisation du degré de décomposition des systèmes racinaires matures contenant des racines ligneuses de diamètre égal ou supérieur à deux centimètres peuvent être réalisés qualitativement et quantitativement (Zanetti, 2010). Nous nous attachons à établir un inventaire des principales méthodes permettant de caractériser la décomposition des racines ligneuses. A l'issue de cet inventaire, nous définirons les choix adoptés vis-à-vis des approches pertinentes pour la réalisation de notre étude.

### *2.1. Le suivi de la décomposition des racines ligneuses in-situ : dispositifs expérimentaux*

Différentes méthodes permettent le suivi de la décomposition des systèmes racinaires in-situ : l'approche chronoséquentielle (Harmon and Sexton, 1996; Ludovici et al., 2002; Yatskov et al., 2003), les séries chronologiques, la mise en place de sacs de décomposition enterrés (Sanallah et al., 2010), la mise en place de pots enterrés recouvert de mailles contenant un échantillon de racine ou encore le suivi de la décomposition par l'intermédiaire de tranchées (Olajuyigbe et al., 2012; Silver and Miya, 2001). Des études ont été réalisées afin de comparer les effets de la taille des mailles sur la vitesse de décomposition des échantillons de racines. Il semble que l'effet soit significatif surtout pour les racines de diamètre important : l'accès aux insectes et autres décomposeurs est facilité par des mailles plus larges (Scheu and Schauer mann, 1994). Par contre, les études sur les effets du taux de décomposition des racines entre les différentes méthodologies sont rares (Silver and Miya, 2001). Olajuyigbe (2012) compare la décomposition de racines ligneuses d'épinette de Sitka en utilisant deux méthodologies : la méthodologie d'excavation de racines par tranchées effectuées sur des souches dont l'âge de coupe est connu et celle des sacs de litières enterrés. Les taux de décomposition trouvés dans cette étude sont différents. Cependant les auteurs évoquent les inconvénients de ces deux dispositifs impliquant irrémédiablement des biais dans les résultats obtenus : d'une part, la méthodologie par tranchée, se trouve principalement biaisée par le fait qu'il est difficile d'estimer la densité initiale des échantillons prélevés et d'autre part, la méthodologie des sacs enterrés ne respecte pas la phénoménologie de la décomposition naturelle des racines (barrière créée par le maillage, modification de la rhizosphère... qui peut ralentir le taux de décomposition des échantillons racinaires).

Pour des échantillons de diamètre important, deux méthodologies sont plus fréquemment utilisées : l'approche chronoséquentielle et l'approche par série chronologique.

L'approche chronoséquentielle est plus rapide. Elle consiste à partir de plusieurs coupes d'arbre dont la date est connue, à comparer l'évolution de la décomposition entre l'état initial et l'état décomposé après  $n$  années de décomposition sur la base d'un ou plusieurs paramètres (évolution de la densité, libération d'éléments nutritifs). Cependant, l'état initial n'est pas toujours connu précisément et l'extrapolation donne à la méthode des biais importants (Harmon and Sexton, 1996). De plus, il est nécessaire de disposer d'un nombre important de souches d'une même espèce dont les dates de coupes sont étalées dans le temps, par exemple, un site d'exploitation forestière. L'approche par série chronologique est, quant à elle, moins soumise aux erreurs résultant de la connaissance des conditions initiales des échantillons. En effet, elle consiste à enterrer sur un dispositif expérimental plusieurs échantillons de racines. Une partie de ces échantillons sont récoltés au cours de l'étude pour être analysés à différents temps de décomposition. Elle nécessite par contre des investissements importants dans le temps puisque la décomposition totale d'échantillons de racines ligneuses est longue, de l'ordre de plusieurs années.

## *2.2. Méthodes pour l'évaluation qualitative de la décomposition des racines ligneuses*

L'évaluation qualitative du bois peut être réalisée dans un premier temps grâce à des critères visuels et tactiles qui permettent d'établir des classes en fonction de degré de décomposition du bois (Sandström et al., 2007; Tobin et al., 2007). Six classes de décomposition sont définies à partir des paramètres : état de l'écorce, fragmentation et dureté du bois.

Un test de résistance à la pénétration de la lame d'un couteau peut également être effectué afin de tester la résistance du bois de la racine (Renvall, 1995). Ce critère de résistance complète l'appréciation qualitative réalisée avec les critères visuels et tactiles.

## *2.3. Méthodes pour l'évaluation quantitative de la décomposition des racines ligneuses*

Plusieurs méthodes permettent d'évaluer quantitativement la décomposition des racines ligneuses. Les plus fréquentes dans la littérature sont l'estimation de la perte de densité et l'évolution de la composition chimique au cours de la décomposition. Nous présentons ci-dessous les principales approches et techniques utilisées pour l'estimation de ces paramètres.

### *2.3.1. Evaluation de la perte de densité du bois en cours de décomposition*

La perte de densité est considérée comme l'une des principales caractéristiques dans le processus de décomposition du bois (Janisch et al., 2005; Krankina and Harmon, 1995; Yatskov et al., 2003). Trois principales méthodes permettent d'estimer la densité d'un échantillon de bois :

- L'estimation par le calcul de son volume en l'apparentant à un cylindre ;
- L'estimation par déplacement d'eau ;
- L'estimation par rayons X.

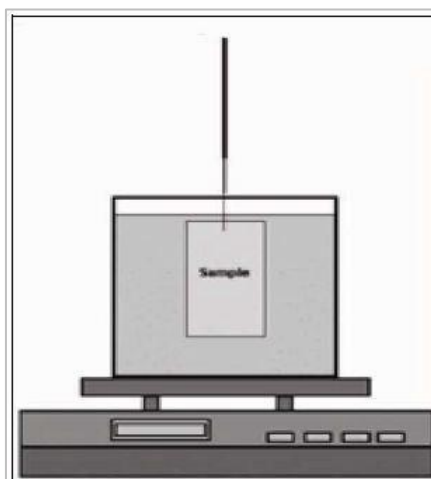
Les deux premières ne nécessitent pas d'équipements spécifiques contrairement à la dernière.

Le calcul du volume d'un échantillon en l'apparentant à un cylindre est la méthode la plus répandue et la plus privilégiée dans la littérature, notamment parce que l'estimation de la densité par déplacement d'eau est plus problématique lorsque la décomposition est avancée (Shorohova et al., 2008). Shorohova et al (2008) étudient la décomposition de souches par une méthode chronoséquentielle après différents types de coupes des arbres (coupe à blanc, coupe par trouées...). La densité initiale et après dix ans de décomposition est calculée à partir de leur volume, le taux de décomposition annuel de chaque échantillon est calculé sur la base du modèle exponentiel simple



d'Olson (Olson, 1963). Une analyse statistique ANOVA permet ensuite d'estimer les effets respectifs de l'espèce d'arbre, du diamètre et de la hauteur des souches.

L'estimation de la densité des échantillons de racines par déplacement d'eau est une technique rapide et fiable lorsque la décomposition n'est pas trop avancée. Le calcul de la densité s'effectue en faisant le rapport entre le poids sec de l'échantillon et le volume d'eau déplacé. La Figure 18 illustre le principe de la mesure.



**Figure 18. Principe de mesure de la densité d'un échantillon de bois par déplacement d'eau (d'après Chave (2006))**

Enfin, l'estimation de la densité par rayons X peut être réalisée à l'aide de deux équipements : la tomographie et la radiographie. La tomographie permet de reconstruire le volume d'un objet à partir d'une série de mesures effectuées par tranche 2D depuis l'extérieur. L'observation de la matière et des géométries internes devient possible, tout comme leur extrapolation en trois dimensions. La radiographie, quant à elle, est une technique qui permet de voir la composition interne d'un objet en image 2D. Ces deux techniques non destructives (Haling et al., 2013) reposent sur la capacité des rayons X à traverser les corps opaques à la lumière, en particulier la matière organique (Osterloh et al., 2008). Ces équipements permettent in fine d'observer la structure interne d'un échantillon sur une image en niveaux de gris, et d'obtenir une cartographie de la densité des échantillons de bois (Freyburger et al., 2009; Longuetaud, 2005).

### 2.3.2. Evaluation de l'évolution chimique du bois en cours de décomposition

Les caractéristiques chimiques (taux de cellulose, lignine, hémicellulose, carbone, azote, polyphénols...) du bois évoluent au cours du processus de décomposition. Plusieurs approches et techniques permettent d'appréhender l'évolution chimique du bois. Nous citons ci-dessous les principales :

- **L'estimation du ratio C:N** qui nécessite de connaître les concentrations de Carbone (C) et d'Azote (N) des différents échantillons analysés. Les analyses sont alors généralement réalisées en utilisant un **analyseur élémentaire** (Elementar Analemsystem GmbH) (Aulen et al., 2012; Creed et al., 2004; Olajuyigbe et al., 2012) ;
- l'estimation de **l'évolution de la cellulose, hémicellulose et lignine** au cours de la décomposition du bois. Les analyses sont alors réalisées soit par **extraction chimique des composés** (Berg et al., 1998; Chen et al., 2001; Dornbush et al., 2002), soit par **Spectrométrie Proche InfraRouge (SPIR)** (Aulen et al., 2012; Chen et al., 2001).

Ces analyses chimiques sont généralement utilisées afin de caractériser et prédire des classes de décomposition (Creed et al., 2004; Goebel et al., 2011).

Les extractions chimiques des composés principaux constituant un échantillon de bois (cellulose, hémicellulose, lignine) sont longues et fastidieuses. La SPIR permet de réaliser une investigation à l'échelle moléculaire, notamment pour les échantillons complexes. Elle informe sur la composition chimique et les propriétés physiques d'un échantillon et leurs possibles interactions.

La SPIR est une technique analytique basée sur le principe d'absorption des rayonnements (infrarouge) par la matière organique. L'énergie lumineuse proche infrarouge se situe entre le visible et le moyen infrarouge, soit à une longueur d'onde comprise entre 800 et 2500 nm. L'unité utilisée dans le proche infrarouge est le nombre d'onde  $\bar{\nu}$ , d'une valeur comprise entre 4000 et 12 500  $\text{cm}^{-1}$ . Le principe de cette technique repose sur les propriétés vibrationnelles des molécules et leur interaction avec la lumière. Un spectre représente, in fine, l'absorption par l'échantillon du rayonnement à chaque longueur d'onde.

Plusieurs auteurs (Aulen et al., (2012), Chen et al., (2001), Picon-Cochard et al., (2009)) ont utilisé la SPIR pour évaluer les caractéristiques chimiques des échantillons de racines. En effet, la SPIR permet d'identifier et prédire les propriétés physiques et chimiques du bois (Kelley et al., 2004; Poke and Raymond, 2006). Elle est souvent utilisée pour définir ou prédire les concentrations des différents composés du bois des racines au cours de leur décomposition comme par exemple les concentrations d'azote (Chen et al., 2001). Elle caractérise et discrimine également les différentes espèces d'arbres (Çetinkol et al., 2012; Lei and Bauhus, 2010).

Le *spectre* proche infrarouge d'un échantillon de racine donne une signature globale de sa composition, qui, avec l'application d'outils chimiométriques, sert pour évaluer la variabilité chimique entre différents échantillons de racines et ainsi, les discriminer. Les outils chimiométriques sont une branche de la chimie analytique qui emploie les outils mathématiques et statistiques. Ces outils aident à extraire l'information pertinente et utile à partir de données physico-chimique mesurées. Ils sont basés sur la construction, puis l'exploitation d'un modèle de comportement. Ils peuvent traiter des systèmes complexes et donc généralement multivariés.

Sandak et al (2010) ont mené une étude visant à caractériser le bois provenant de sites archéologiques. Différents échantillons de bois de chêne sont analysés chacun provenant d'une époque différentes, l'un d'entre eux étant contemporain et servant de référence. Quatre types d'analyse sont réalisés sur chaque échantillon: l'estimation de la densité, l'analyse de la microstructure des échantillons à l'aide des rayons X, une analyse chimique par extraction des composés chimiques (cellulose, lignine, ..), et enfin des mesures SPIR sont réalisées sur chaque échantillon. Le traitement des données est réalisé à l'aide de deux outils chimiométriques : l'analyse en composante principale et la régression des moindres carrés partiels. Une bonne séparation est observée sur l'ACP entre les échantillons provenant de différents niveaux de dégradation. Elle est d'autant plus significative entre les échantillons de bois archéologique provenant d'environnement saturés en eau et l'échantillon contemporain. D'autre part, une seconde analyse montre qu'il existe tout de même des différences significatives entre les échantillons de bois provenant uniquement des sites archéologiques. Cette étude montre également à l'aide d'une régression PLS, le potentiel de la SPIR pour la prédiction des composés chimiques.

La SPIR est une technique présentant un fort potentiel, comparable en efficacité aux méthodes classiques d'extraction mais avec un gain de temps considérable (Jones et al., 2006; Kelley et al., 2004; Malkavaara and Raimo, 1998). En effet, la SPIR est rapide, ne requiert pas de préparation importante des échantillons et l'on peut réutiliser l'échantillon ultérieurement car le passage en SPIR ne modifie pas les caractéristiques de ce dernier (Marten et al., 1989).

## 2.4. Synthèse et choix des méthodes utilisées

Le suivi de la décomposition des racines ligneuses à différents pas de temps nécessite a priori, la mise en place d'un dispositif expérimental. Dans notre étude, le dispositif mis en place s'apparente plutôt à une approche par séries chronologiques. Il permet de suivre l'évolution de la décomposition



des racines ligneuses de différentes espèces et de différents diamètres. Nous détaillons la mise en place de nos dispositifs expérimentaux, ainsi que notre protocole de récolte des échantillons dans la seconde partie de ce mémoire.

Plusieurs méthodes permettant de caractériser la décomposition des racines au cours du temps sont possibles. *Les méthodes qualitatives* permettent de classer rapidement, selon des critères visuels ou de résistance, les échantillons de racines selon différents stades de décomposition. Nous utilisons ces méthodes sur le terrain car elles sont faciles à mettre en œuvre. De plus, associées à des photos et une description de chaque échantillon, elles permettront de confirmer ou au moins expliquer les résultats obtenus en laboratoire à l'aide des méthodes quantitatives. *Les méthodes quantitatives* peuvent se scinder en deux grandes catégories :

- L'estimation de la perte de densité du bois en cours de décomposition ;
- L'estimation de l'évolution de la composition chimique du bois des racines en cours de décomposition.

Nous choisissons de travailler sur ces deux paramètres. Dans un premier temps, nous relevons la perte de densité de nos échantillons de racines aux différents stades de décomposition. Nous optons pour l'estimation de la densité par déplacement d'eau car cette technique est facile à mettre en œuvre. De plus, nous ne cherchons pas à axer ces recherches uniquement sur ce paramètre mais plutôt à l'utiliser comme mesure de référence. Nous souhaitons suivre l'évolution chimique du bois des racines au cours de leur décomposition. Pour cela, nous choisissons d'utiliser la spectrométrie proche infrarouge (SPIR). En effet, cette technique qui est d'une part rapide et fiable, est capable de nous donner une signature chimique globale propre à chaque échantillon. D'autre part, grâce à l'utilisation des outils chimiométriques elle permet de discriminer les échantillons de racines entre eux et ce, en fonction du stade de décomposition de chaque échantillon, de son espèce et de son diamètre. Ces critères sont déterminants dans la prise en compte du risque encouru vis-à-vis d'une initiation ou d'une aggravation du mécanisme de détérioration par érosion interne d'un ouvrage hydraulique en remblai.

## **Chapitre 3. Approches pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques**

Afin de veiller à la sécurité et assurer la maintenance optimale des ouvrages hydrauliques en service, les gestionnaires effectuent des diagnostics rapides et / ou détaillés de leurs ouvrages. Ces diagnostics passent généralement par une évaluation de leur performance. Nous énonçons dans un premier temps les principales définitions rattachées à la performance des ouvrages hydrauliques, puis nous énumérons les principales méthodes qui en permettent l'évaluation. Enfin, nous énonçons notre choix quant à la méthode utilisée pour évaluer la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation ligneuse.

### **1. Définitions liées à la performance des ouvrages hydrauliques**

Nous définissons la *performance d'un ouvrage hydraulique* comme sa capacité, à un instant donné, à remplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu. Par extension, on parle de « performance d'une fonction » pour indiquer l'état de réalisation d'une fonction (Cremona, 2003).

Les performances de ce système de génie civil sont amenées à évoluer durant sa vie. Trois principales causes peuvent provoquer les pertes de performance d'un ouvrage (Cremona, 2003) :

- Le vieillissement de l'infrastructure ;
- Les causes humaines s'exerçant par erreur ;
- Les causes extérieures prévues ou imprévues.

Ces pertes de performance sont observées d'une part au niveau des différents composants de l'ouvrage et aux fonctions de conception correspondantes, contribuant à son fonctionnement global. Par exemple, pour un barrage, ces fonctions correspondent à la perte de performance de la fonction d'étanchéité ou de la fonction de drainage. Nous sommes alors dans le cadre des ELS (Etats Limites de Services). D'autre part, la performance d'un ouvrage hydraulique fait référence à la capacité de l'ouvrage à résister aux différents mécanismes de détérioration (érosion interne, érosion externe, instabilité) qui peuvent conduire à la rupture de ce dernier. Nous sommes alors dans le cadre des ELU (Etats Limites Ultimes). Les fonctions concernées sont alors les fonctions de résistance par rapport aux mécanismes de détérioration (Curt, 2008).

Nous utilisons dans la suite du mémoire le terme de « performance » pour désigner l'ensemble des performances des différentes fonctions (nommés « critères fonctionnels » pour les digues de protection du fait de l'utilisation des méthodes multicritères utilisés pour l'évaluation de leur performance) et des performances vis-à-vis des différents mécanismes de détériorations possibles, pouvant conduire à une brèche ou une rupture de l'ouvrage. Il nous paraît important de travailler sur ces deux grandeurs. En effet, la performance des fonctions ne renseigne pas sur l'état global de l'ouvrage hydraulique, mais permet (Curt, 2008) :

- de prendre en considération des éléments précurseurs au mécanisme de détérioration étudié afin de le détecter le plus tôt possible ;
- de distinguer les fonctions dégradées et de décider des actions de maintenance et de réparation de manière ciblée : par exemple, la perte de performance de la fonction perméabilité du corps d'une digue de protection fluviale va être corrigée par le dessouchage d'arbres morts dont la décomposition des systèmes racinaires est avancée, puis par la reconstitution locale du talus de l'ouvrage.

La performance vis-à-vis des mécanismes de détérioration tels que l'érosion et l'affouillement dans ce mémoire, a l'avantage de fournir une évaluation globale de l'ouvrage et permet, notamment pour les ouvrages à charge permanente, de prendre des décisions d'urgence (vidange partielle ou totale).

## **2. Méthodes pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques**

Afin d'évaluer la performance d'un ouvrage hydraulique, nous nous plaçons dans le cadre du diagnostic des défaillances des systèmes de génie civil.

L'AFNOR (2001) définit que le diagnostic d'un ouvrage de génie civil s'opère par : « *l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillances (s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test* ».

Différentes approches sont possibles pour réaliser ce diagnostic (Peyras et al., 2004; Racoceanu, 2006; Zwingelstein, 1995) : **l'approche par modélisation physique, l'approche par modélisation fonctionnelle, l'approche par analyse statistique, les approches basées sur l'intelligence artificielle, les approches multicritères.**

Bien que la dernière approche soit particulièrement liée à l'expertise, la plupart de ces différentes approches accordent un rôle important à l'expertise et ce, à différents niveaux. En effet, l'expert intervient généralement dans toutes les activités de diagnostic et d'analyse des risques relatives aux ouvrages hydrauliques :

- pour le calage des hypothèses des modèles physiques (actions, résistances des matériaux) ;
- pour l'évaluation des probabilités subjectives dans les modèles fonctionnels ;
- pour la vérification des données d'auscultation dans les modèles statistiques ;
- pour construire des modèles à base de connaissances.

Dans ces modèles, l'expertise permet en outre l'interprétation et la validation des résultats.

Lors d'un diagnostic approfondi d'ouvrages hydrauliques, **les différentes approches sont complémentaires et peuvent être conduites simultanément** (Peyras, 2003). L'expert intervient alors pour synthétiser l'ensemble des résultats et donner les conclusions.

Nous présentons ci-dessous ces différentes approches afin de souligner les avantages et les limites de chacune d'entre elles.

### **2.1. Modélisation physique**

Les méthodes de diagnostic des défaillances par **modélisation physique** reposent sur la modélisation physique des processus de dégradation au sein du système, en prenant en compte les équations qui régissent les phénomènes internes. Elles impliquent une connaissance approfondie du système sous la forme de modèles mathématiques et de simulations numériques et repose sur des mesures instrumentales de l'ouvrage analysé. Pour une meilleure robustesse, ces modèles mathématiques sont généralement appuyés par la mise en place de modèles physiques de laboratoire. Ces modèles physiques de laboratoire reproduisent, sur un modèle à échelle réduite, les différents mécanismes pouvant s'opérer sur des ouvrages réels. Dans le contexte des ouvrages hydrauliques, les modèles physiques peuvent se classer en deux catégories :

- les **modèles d'analyse de la stabilité** qui permettent d'apprécier la sécurité d'un ouvrage en déterminant les critères de stabilité liés aux états-limites dans les conditions réelles d'exploitation ;
- les **modèles d'analyse du comportement** qui permettent d'apprécier la normalité des déplacements et des écoulements, d'évaluer les déplacements futurs ou de déterminer les contraintes et les déformations.

Ce type d'approche est essentiel lors du dimensionnement ou de la conception de l'ouvrage. De même, pour un ouvrage équipé d'instruments d'auscultation sur lesquels ce type de modélisation s'appuie, la possibilité d'analyser un ouvrage en service par modélisation physique lors de revues de

sûreté est très intéressante. Cependant, pour le suivi au cours de la vie d'un ouvrage, l'absence courantes d'instruments d'auscultation sur les digues de protection fluviales ou les petits barrages (ouvrages auxquels nous nous intéressons dans ce mémoire), limite l'emploi de cette approche. De plus, tous les mécanismes de détérioration ne sont pas accessibles par des modèles numériques. Nous nous intéressons plus particulièrement dans ce mémoire aux mécanismes de détérioration par érosion interne et par affouillement. Or, ces mécanismes ne sont actuellement pas accessibles par des modèles numériques à l'échelle de l'ouvrage. Cependant, les modèles physiques développés sur des échelles plus réduites, comme par exemple à l'échelle du matériau (vis-à-vis de son érodabilité), nous permettent de disposer d'une information très importante concernant le type de mécanisme de détérioration analysé (Benahmed and Bonelli, 2007; Lachouette et al., 2007).

## 2.2. Modélisation fonctionnelle

Les méthodes de diagnostic des défaillances par *modélisation fonctionnelle* reposent sur les techniques de modélisation fonctionnelle des systèmes en se basant sur une analyse systémique. Le principe des méthodes de modélisation fonctionnelle est de déterminer les interactions entre les composants du système et son environnement, de façon à établir de manière formelle et exhaustive les liens entre les défaillances, leurs causes et leurs effets. Il existe différentes techniques issues de la *Sûreté de Fonctionnement* qui permettent la modélisation fonctionnelle des systèmes : l'AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leur Effets), les méthodes de l'Arbre des Conséquences ou d'Evènements...

Ces approches fonctionnelles ont été appliquées par exemple aux produits du bâtiment (Lair and Boissier, 2000; Talon, 2006), au tunnels (HIDALGO et al., 2013), aux barrages poids (Peyras, 2003), aux barrages en remblai (Figeac, 2003) et aux digues de protection contre les inondations (Serre, 2005; Vuillet, 2012). Elles ont conduit notamment pour les ouvrages hydrauliques, à la construction d'un modèle fonctionnel de vieillissement en utilisant une représentation sous forme de graphes orientés en enchaînant des séquences successives de défaillances.

L'avantage de ce modèle générique est qu'il est utilisable pour tous les mécanismes de détérioration. Il reste toutefois un modèle qualitatif de description des mécanismes de détérioration et ne permet donc pas l'évaluation de la performance. Il est par contre fondamental pour la compréhension de l'enchaînement des défaillances vis-à-vis d'un mécanisme de détérioration pouvant mener à la rupture d'un ouvrage hydraulique. Par conséquent, cette approche est généralement menée en amont de l'utilisation d'une méthode quantitative d'évaluation de la performance.

## 2.3. Analyse statistique

L'approche par analyse statistique peut s'appliquer sur les données de retour d'expérience ou données historiques d'un parc d'ouvrages hydrauliques homogène ou bien sur les données issues de l'auscultation au cours de la vie d'un ouvrage donné.

Les méthodes de diagnostic des défaillances par *l'analyse statistique* nécessitent un retour d'expérience riche et documenté, ce qui est le cas dans les parcs importants de matériels identiques. Les méthodes statistiques appliquées aux données du retour d'expérience permettent d'établir des corrélations entre les défaillances et les symptômes. Dans le contexte des ouvrages hydrauliques et du fait de l'hétérogénéité du parc en termes de conception, âge, conditions environnementales... qui génère des échantillons homogènes de très faible taille, les méthodes de diagnostic des défaillances par l'analyse statistique s'appliquent surtout aux données issues de l'auscultation (Foster et al., 2000) (auscultation des débits de fuites, de la piézométrie, des déplacements, ...).

L'avantage de cette analyse des données issues de l'auscultation est qu'il est possible de considérer ces mesures en dehors de l'influence des paramètres extérieurs (pluie, effets saisonniers,...). En se ramenant à des conditions constantes, il est donc possible d'analyser le comportement de l'ouvrage au cours du temps et de détecter l'apparition de mécanismes de

détérioration. La limite principale de cette approche est que de nombreux ouvrages, notamment ceux que l'on étudie dans ce mémoire (digues de protection fluviale et petits barrages) sont peu ou pas équipés de dispositifs d'auscultation. D'autre part, certains mécanismes ne sont pas facilement mis en évidence par des données d'auscultation, comme par exemple l'érosion interne liée à un ouvrage traversant. Si elle est utilisable, cette approche et les résultats obtenus peuvent néanmoins constituer un support d'informations important et constituent une base essentielle à une autre approche d'évaluation de la performance.

## 2.4. Méthodes basées sur l'intelligence artificielle

De manière générale, les méthodes basées sur l'intelligence artificielle sont bien adaptées aux problèmes du diagnostic. En effet, elles permettent assez facilement de pallier la complexité des systèmes à diagnostiquer (Racoceanu, 2006). L'intelligence artificielle peut notamment se caractériser par sa capacité à traiter :

- une grande quantité d'information ;
- des données non homogènes (numériques ou symboliques) ;
- des données incomplètes.

Dans le contexte du diagnostic des systèmes de génie civil et plus spécifiquement des ouvrages hydrauliques, quatre principaux outils issus de l'intelligence artificielle sont utilisés :

- les réseaux de neurones (Su et al., 2007; Wu and Su, 2005) ;
- les réseaux bayésiens (Liu et al., 2012; Xu et al., 2011; Zhang et al., 2011) ;
- les systèmes à base de connaissances (Andersen et al., 2001, 1995; Curt, 2008) ;
- les approches à base de modèles multiples (Fakhfakh et al., 2012)

### 2.4.1. Réseaux de neurones

Les approches consistant à réaliser le diagnostic d'un système de génie civil à l'aide de réseaux de neurones reposent sur une inspiration neurobiologique. En effet, les réseaux de neurones artificiels sont une forme d'intelligence artificielle qui tente de simuler la structure biologique du cerveau humain et du système nerveux à l'aide de leur architecture (Gupta et al., 2006). La Figure 19 illustre cette architecture. Ils permettent, au même titre que les réseaux bayésiens, d'extraire d'une base de données des relations entre variables (variables d'entrée jusqu'à une variable de sortie) sans aucune hypothèse ou connaissance a priori sur les phénomènes.

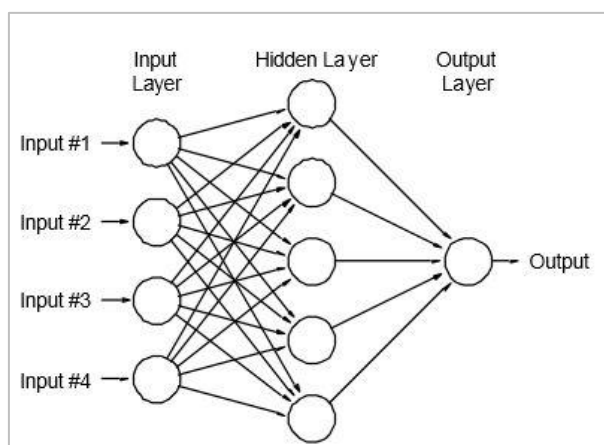


Figure 19. Représentation d'un réseau de neurone simple à 3 couches (Rounds, 2002)

Leur développement passe par la présence de modélisation physique, fonctionnelle, statistique ou à partir de la connaissance experte. Dans tous les cas, la présence d'une base de données est nécessaire

pour la construction puis la validation des modèles. Les applications des réseaux de neurones aux ouvrages hydrauliques concernent notamment l'analyse et la prédiction du comportement et de la santé des barrages (Su et al., 2007). Pour réaliser un diagnostic, il est nécessaire de supposer des « classes de performance » préalables. Les réseaux de neurones permettent ensuite de déterminer à quelle classe appartient une situation particulière.

L'avantage de l'utilisation des réseaux de neurones artificiels est leur aptitude à s'adapter grâce à une modification de leur structure. Ils fournissent un ensemble d'outils puissants pour l'apprentissage inductif de connaissances dédiées au diagnostic à partir d'exemples représentatifs. Ils sont opérationnels même en cas d'insuffisance de valeurs. L'inconvénient le plus important de ces approches, par exemple par rapport aux méthodes à base de connaissances ou aux arbres de décisions, est que leur comportement est difficile à comprendre car ils s'appuient sur des calculs numériques impliquant un grand nombre de pondérations dont la définition est en grande partie de nature heuristique. Des combinaisons entre les réseaux neuronaux et d'autres approches sont néanmoins possibles, ce qui offre des systèmes hybrides intéressants (Piechowiak, 2003). Ce type de combinaison a été utilisé dans le cadre du développement d'un modèle de diagnostic et d'évaluation de la santé des barrages (Wu and Su, 2005).

#### 2.4.2. Réseaux bayésiens

Un diagnostic réalisé à partir des réseaux bayésiens a la particularité d'exprimer une distribution de probabilités sur un ensemble de variables en exprimant les relations de cause à effet. Ces modèles statistiques sont, comme les modèles neuromimétiques, capables d'apprendre à partir d'exemples, mais l'apprentissage consiste dans le cas des réseaux bayésiens à mémoriser des distributions de probabilités à l'aide d'algorithmes souvent complexes mais dont les propriétés sont parfaitement connues. Ces modèles peuvent également être générés à partir de données fournies par des experts. Les réseaux bayésiens sont des graphes constitués de nœuds représentant les concepts d'un domaine et d'arcs représentant des relations de causalité probabilisées entre deux concepts. Un réseau bayésien permet de mener un raisonnement probabiliste sur des faits multiples grâce à des mécanismes de propagation de probabilités à travers le réseau.

Dans le domaine du diagnostic des défaillances des ouvrages hydrauliques, les réseaux bayésiens ont par exemple été utilisés par Xu et al (2011). Le réseau bayésien est construit à partir d'une base de données répertoriant les défaillances de barrages à travers le monde. Il est ensuite utilisé afin de diagnostiquer les facteurs clés causant une ou les défaillances d'un barrage spécifique.

Ce type d'approches est particulièrement intéressant lorsque la connaissance exploitée lors d'un raisonnement en diagnostic est incertaine. Un autre avantage des réseaux bayésiens est que la représentation par graphes permet une visualisation claire des relations impliquées. Deux principaux inconvénients peuvent être reprochés à ces réseaux : le premier est qu'il est nécessaire de connaître le graphe de causalité (mais généralement, dans les cas des ouvrages hydrauliques, ce graphe est connu) ; le second est que toutes les probabilités conditionnelles des variables doivent être connues.

#### 2.4.3. Méthodes à base de connaissances

Les méthodes ou systèmes à base de connaissance (SBC) expertes (anciennement appelés « systèmes experts ») sont des approches qui s'appuient sur des connaissances relatives à un domaine, dans notre cas les ouvrages hydrauliques, et qui permettent de résoudre un problème donné tel qu'une tâche d'identification, de classification, de reconnaissance, de diagnostic... (Schreiber et al., 1999).

Dans notre cas, nous nous intéressons plus spécifiquement aux tâches d'analyse que sont l'évaluation, le diagnostic, le suivi et éventuellement la prédiction des défaillances des ouvrages hydrauliques. Le principe des méthodes à base de connaissance repose sur le recueil et la formalisation des connaissances théoriques et heuristiques d'expert du domaine par un cognoscien (Akerkar and Sajja, 2009; Booker and McNamara, 2004). Ces méthodes ont la capacité de reproduire le raisonnement d'un expert et sont capables de raisonner avec des connaissances d'origine et de nature

diverses (Zwingelstein, 1995). L'apport essentiel de cette approche est que le système peut justifier à l'utilisateur des étapes intermédiaires de calcul ou de raisonnement.

Concevoir un système à base de connaissances consiste à modéliser puis à représenter des connaissances à l'aide d'un formalisme de représentation, puis à manipuler les connaissances par l'intermédiaire de règles d'inférence pour résoudre les problèmes posés (Kayser, 1997). La Figure 20 illustre l'architecture d'un système à base de connaissances.

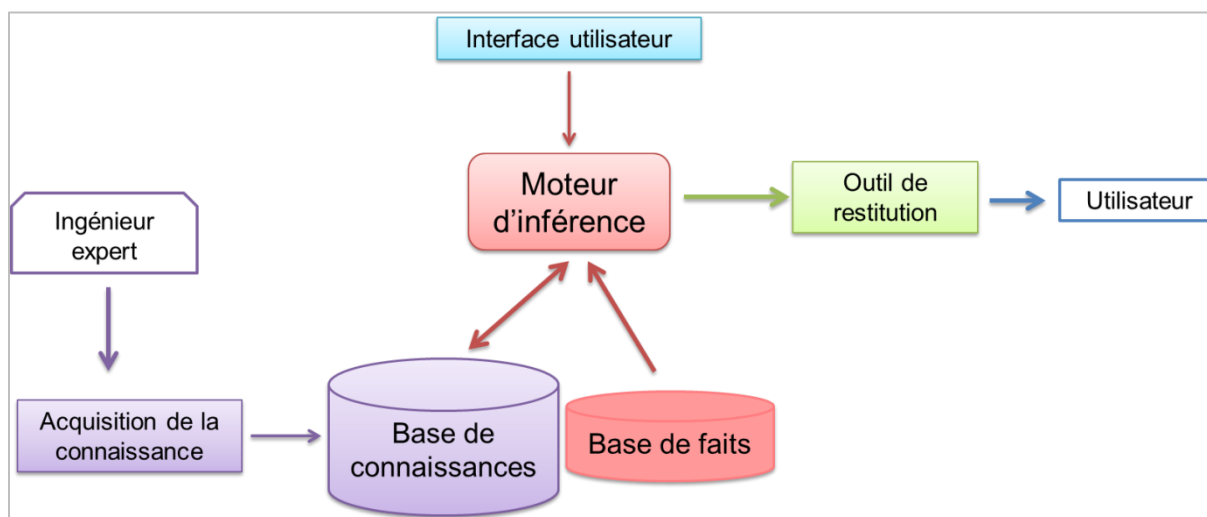


Figure 20. Architecture d'un système à base de connaissances

La **base de connaissances** qui contient les connaissances acquises auprès d'experts et leurs règles d'agrégation ainsi que la **base de faits** correspondant aux données mesurées sur le terrain alimentent le moteur d'inférence. Le moteur d'inférence met en œuvre le processus de raisonnement de l'intelligence artificielle qui est une analogie avec le raisonnement expert (Prasad et al., 1996). Il fournit alors un diagnostic tout comme le ferait un expert humain.

Les mécanismes de détérioration des ouvrages hydrauliques auxquels nous nous intéressons dans ce mémoire, à savoir l'érosion interne et externe, sont liés à un nombre important de paramètres interdépendants qui doivent être pris en compte dans le modèle de diagnostic. La base de connaissance doit ainsi mettre en œuvre un type d'agrégation adapté aux données d'origine et de nature différentes que nous sommes susceptibles d'utiliser. Le type d'agrégation le plus fréquemment utilisé est l'affectation à base de règles de type SI...ALORS (Zhao and Chen, 2001).

Ces modèles à base de connaissances sont utilisés dans le domaine du génie civil. Farinha & al (2005) se penchent sur la problématique du développement de systèmes à base de connaissances dans le cadre des ouvrages de génie civil qui aideraient les ingénieurs dans leurs processus de décision. Deux types de systèmes de génie civil (barrage et tunnel de chemin de fer) pour lesquels a été développée une méthode à base de connaissances sont présentés. De même, une méthode a été mise en œuvre à Irstea, Aix en Provence pour les barrages (Curt, 2008).

Un modèle à base de connaissances offre de nombreux avantages. Entre autres, une fois développé, il est toujours **accessible**, à la différence des experts humains qu'il est parfois délicat de solliciter. Il est **cohérent** et offre une bonne représentation des connaissances expertes sans générer d'erreurs lors de ses multiples utilisations. Il permet également de **gérer la connaissance et faciliter la formation**. De plus, il reste **évolutif et peut prendre en compte les incertitudes et imperfections** sur les données à travers par exemple des probabilités subjectives, de la logique floue ou de la théorie des possibilités (Bouchon-Meunier, 1999). Les principales limites d'un tel système dépendent de la qualité de l'apport des connaissances des experts humains pour le développement de la base de connaissance et du moteur d'inférence.

#### 2.4.4. Méthodes à base de modèles multiples

Une méthode de diagnostic de barrage basée sur une approche multi-modèles a été proposée par Fakhfakh et al (2012). Le processus de modélisation considère qu'un barrage est un réseau de composants génériques et définit plusieurs modèles (structurel, fonctionnel et comportemental) pour chaque composant. Ces modèles sont liés entre eux par un certain nombre de variables. L'algorithme de diagnostic développé compare les comportements réels et attendus à partir des mesures visuelles et instrumentales disponibles sur l'ouvrage. La méthode a été appliquée sur un cas réel de barrage concerné par des phénomènes de détérioration dus à de mauvaises conditions de conception et de construction. L'algorithme couplé à l'approche de modélisation multiple, permet la détection précoce et l'explication de la détérioration du comportement du barrage. Les résultats doivent être encore validés sur d'autres cas. Les modèles ne concernent actuellement que les barrages en remblai homogène.

#### 2.5. Méthodes multicritères

L'agrégation des connaissances dans le modèle peut être réalisée à l'aide des **méthodes d'agrégation multicritères** qui reposent sur la mise en œuvre de méthodes mathématiques définies au préalable. Plusieurs méthodes sont possibles :

- **les méthodes multicritères élémentaires** (Roy and Bouyssou, 1993) comme la méthode du « MIN » ou « la moyenne pondérée » ;
- **les méthodes du critère unique de synthèse** (Keeney and Raiffa, 1993; Saaty, 1980) qui regroupent les méthodes MAVT (Multiple Attribute Theory), MAUT (Multiple Attribute Utility Theory), AHP (Analytic Hierarchy Process), MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique) ;
- **les méthodes de surclassement de synthèse** (Roy and Bouyssou, 1993) (ELECTRE I, II, III et ELECTRE TRI).

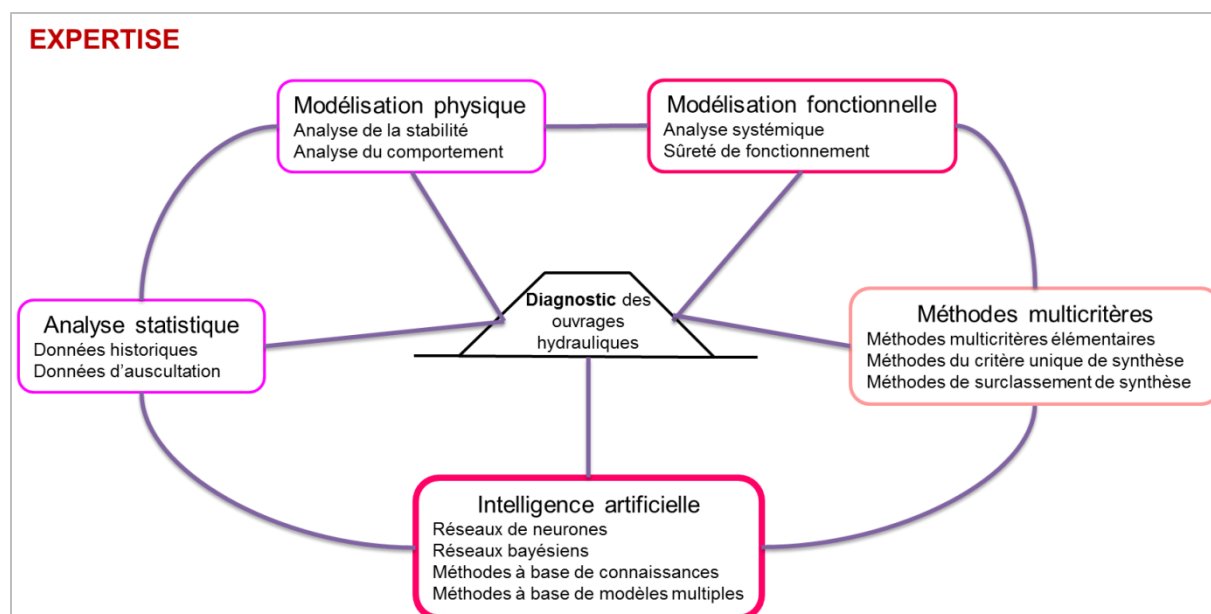
Toutes ces méthodes d'agrégation offrent des avantages et des inconvénients et le choix de la méthode d'agrégation est réalisé en fonction du problème multicritère qui se pose. Le lecteur est renvoyé aux travaux de Tacnet (2009) et Vuillet (2012) qui dressent un panorama synthétique de chacune de ces méthodes.

Serre (2005) et Vuillet (2012) utilisent ces méthodes pour développer des modèles d'évaluation de la performance des digues fluviales. Cependant, les agrégations d'indicateurs d'état puis des critères pour l'obtention d'un indicateur de performance (travaux de Serre (2005)) sont réalisées à l'aide des méthodes d'affectation à base de règles ce qui rend leur démarche très proche des méthodes à base de connaissances.

#### 2.6. Synthèse et justification de la méthode utilisée

Le diagnostic des ouvrages hydrauliques qui passe par une évaluation de leur performance peut être réalisé à l'aide de plusieurs méthodes. Ces méthodes sont complémentaires et nécessitent l'avis d'un expert du domaine qui intervient au cours des différentes phases du développement des modèles (calage des hypothèses, vérifications, élicitation des connaissances, validation). La Figure 21 synthétise les différentes méthodes utilisées pour le diagnostic des ouvrages hydrauliques.





**Figure 21. Les approches du diagnostic dans le domaine des ouvrages hydrauliques et représentation de leur complémentarité (adapté à partir de (Peyras, 2003))**

Pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne et affouillement du fait de la présence de végétation arborescente, nous choisissons d'employer les méthodes à base de connaissances. Ce type d'agrégation a pour intérêt d'être proche du raisonnement réalisé par les experts que nous cherchons à mimer et d'être lisible pour les futurs utilisateurs. Il a également l'avantage d'être un modèle de type boîte blanche en explicitant les connaissances plutôt que boîte noire (comme les réseaux de neurones par exemple). Par ailleurs, ces méthodes déjà utilisées dans le cadre de l'évaluation de la performance des digues (Vuillet, 2012) et des barrages (Curt, 2008) pourront être améliorées et adaptées au contexte des ouvrages hydrauliques soumis à la présence de végétation arborescente et en présence / absence de dispositifs de drainage et d'instruments d'auscultation (Tableau 1). Notre démarche débute par une analyse de ces modèles (partie 2, chap.1, section 1).

Les connaissances recueillies et formalisées seront agrégées dans le modèle sur la base de règles expertes SI...ALORS qui permettent de résoudre un problème grâce à des règles dérivées de la connaissance experte (Hayes-Roth, 1985).

## ***Chapitre 4. Synthèse de la problématique et questions scientifiques associées***

### ***1. Synthèse de la problématique***

La sécurité des ouvrages hydrauliques est une priorité pour leurs gestionnaires ou propriétaires car les conséquences d'une rupture peuvent être dramatiques tant au niveau humain qu'économique. Nous nous intéressons plus particulièrement dans ce mémoire aux petits barrages en remblai et aux digues de protection fluviales en remblai homogène potentiellement affectés par la présence de végétation arborescente. Pour ces deux types d'ouvrages nous cherchons donc à développer des méthodes et outils pour l'évaluation de leur performance, sachant qu'ils entraînent chacun des questionnements différents puisque :

- les petits barrages sont des ouvrages à charge permanente, ponctuel (non linéaire) et susceptible de posséder un dispositif de drainage et des instruments d'auscultation ;
- les digues de protection fluviales sont des ouvrages à charge temporaire, de grand linéaire et ne disposant a priori ni de système de drainage, ni d'instruments d'auscultation.

Dans le cas des ouvrages hydrauliques à charge permanente, l'évaluation de la performance est réalisée en fonction de l'état actuel de l'ouvrage. Le fait que l'ouvrage soit continuellement soumis à une charge hydraulique permet d'observer en temps réel d'éventuelles anomalies.

Dans le cas des ouvrages hydrauliques à charge temporaire, l'évaluation de leur performance vis-à-vis d'un mécanisme de détérioration, doit être réalisée en prenant en considération l'impact de la prochaine crue sur l'ouvrage (crue de protection, crue de sûreté ou crue de danger). Cette évaluation peut également être réalisée en se projetant à la prochaine évaluation décennale (étude de danger – EDD) de l'ouvrage.

La présence de végétation arborescente sur ces ouvrages hydrauliques en remblai ou à leurs abords est fréquente. Celle-ci est présente soit à cause d'un manque d'entretien qui a favorisé son développement soit parce qu'elle a été plantée volontairement dans un objectif de stabilisation, d'amélioration paysagère ou d'ombrage. Nous avons montré l'influence de cette végétation et notamment de ses racines ligneuses sur la performance et la sécurité des ouvrages hydrauliques : elle peut participer à des mécanismes d'érosion interne et externe en étant un élément initiateur ou aggravant de ces mécanismes de détérioration. Par exemple, la décomposition des racines ligneuses peut créer autant de chemins préférentiels pour les écoulements internes et donc favoriser un mécanisme de détérioration par érosion interne.

Ainsi, comme le montre l'analyse que nous avons réalisée dans cette première partie, la présence de végétation arborescente sur ou aux abords d'un ouvrage hydraulique apparaît comme un élément indésirable qu'il faut dans l'idéal éliminer. Toutefois, comme nous l'avons vu une simple coupe sans travaux de confortement n'est pas envisageable. La gestion de la végétation arborescente sur les ouvrages hydrauliques en remblai, digues de protection fluviales, digues de canaux ou barrages, est donc un enjeu majeur pour de nombreux gestionnaires.

Des plans de gestion de la végétation ligneuse ont vu le jour sur les ouvrages à grand linéaire comme par exemple le plan de gestion de la végétation les digues de protection contre les inondations de l'Isère (Ripert and Doirat, 2003) ou des digues de canaux du Rhône (Chandioux and Vennetier, 2003; Vennetier et al, 2001). Ces plans de gestion permettent de prioriser les zones d'intervention et d'établir un planning des actions à mener sur une échelle de temps d'environ dix ans. Les zones d'intervention prioritaire sont identifiées par un ou des ingénieurs experts en gestion de la végétation mais aucun outil méthodologique n'a été établi afin de permettre aux gestionnaires et bureaux d'étude

non spécialisés dans la gestion de la végétation d'établir un diagnostic de manière robuste. Par ailleurs, la connaissance est ainsi formalisée et donc transmissible.

Cette thèse vise ainsi à proposer des méthodes permettant d'évaluer la performance d'ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborée. Nous avons mené une analyse des différentes méthodes et conclu sur l'utilisation de méthodes basées sur l'intelligence artificielle et plus spécifiquement les méthodes à base de connaissances qui présentent un certain nombre d'avantages comme par exemple, une bonne représentation des connaissances expertes, une gestion de ces connaissances ainsi qu'une formation des nouveaux utilisateurs facilitée.

Or, des outils et des méthodes de diagnostic des ouvrages hydrauliques à charge temporaire et à charge permanente existent. Ces méthodes consistent à évaluer la performance d'un ouvrage vis-à-vis des différents mécanismes de détérioration pouvant le mener jusqu'à sa rupture. Nous visons à enrichir et préciser ces modèles afin de proposer des méthodes répondant à notre objectif. Deux grands types d'approches seront mises en œuvre : recueil et formalisation de connaissances expertes pour le développement des modèles, méthodes qualitatives et quantitatives (densité, SPIR) indirectes pour l'analyse de la décomposition des racines ligneuses implantées dans les ouvrages hydrauliques.

## **2. Questions scientifiques**

Dans ce contexte, notre travail de recherche a pour but principal **d'élaborer des modèles robustes pour évaluer la performance des ouvrages hydrauliques en remblai vis-à-vis des mécanismes de détérioration potentiels du fait de la présence de végétation arborée**. L'objectif étant de fournir des méthodes de diagnostics destinés aux ingénieurs. Des modèles doivent être développés pour les deux types d'ouvrages hydrauliques en remblai auxquels nous nous intéressons. Les questions suivantes se posent :

- Quelles fonctions de résistance doit posséder l'ouvrage vis-à-vis des contraintes liées à la présence de végétation arborescente ?
- Est-il possible de produire puis de formaliser, des mesures permettant de prendre en compte la végétation arborescente à partir du recueil d'expertise de manière à les rendre répétables et reproductibles ?
- Est-on capable de développer une mesure indirecte permettant d'appréhender l'évolution de la décomposition des systèmes racinaires suite à la mort naturelle de l'arbre ou après son abattage ?
- Est-on capable de proposer des modèles d'évaluation de la performance qui s'adaptent aux différents types d'ouvrages hydrauliques rencontrés notamment dans le cas des barrages (présence de dispositifs d'étanchéité, de drainage, de systèmes d'auscultation ...) ?
- Comment valider ces modèles ?

## Partie 2

# Méthodologies pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente

*Chapitre 1. Démarche méthodologique générale*

*Chapitre 2. Identification et formalisation des indicateurs d'état pour les modèles d'évaluation de la performance*

*Chapitre 3. Développement de mesures indirectes pour l'estimation du degré de décomposition des racines ligneuses*

*Chapitre 4. Démarche pour la construction des modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente*

*Chapitre 5. Procédure : démarche de calibration et de validation des modèles*

*Chapitre 6. Synthèse*



## Chapitre 1. Démarche méthodologique générale

Dans ce chapitre, nous présentons dans un premier temps les modèles existants pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai et leurs limites. Puis, nous exposons la méthodologie générale que nous adoptons afin de développer des modèles l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente.

### 1. Analyse des modèles existants pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai

Des modèles pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai vis-à-vis des différents mécanismes de détérioration ont été développés par Vuillet (2012) pour les digues fluviales en remblai homogène et par Curt (2008) pour les barrages en remblai. Ces modèles ont une structure hiérarchique à trois niveaux. L'indicateur de performance vis-à-vis d'un mécanisme de détérioration donnée est la sortie du modèle. Il est obtenu par agrégation de critères fonctionnels (ou performance des fonctions) eux-mêmes évalués à partir d'indicateurs d'état qui sont ainsi les entrées du modèle. Pour les digues fluviales en remblai homogène une liste d'indicateurs d'état non formalisés a été mise en place par Vuillet (2012) : fournie à l'utilisateur du modèle d'évaluation, elle l'aide à évaluer les critères fonctionnels relatifs au mécanisme de détérioration considéré qui sont alors les entrées du modèle. La démarche d'évaluation est par conséquent évaluée au niveau le plus haut du modèle mais le passage indicateurs d'état – critère fonctionnel se fait uniquement à dire d'expert à partir de variables non formalisées. Pour les barrages la démarche d'évaluation est réalisée à partir des indicateurs d'état.

Les indicateurs d'état sont issus d'une ou plusieurs données d'entrée, relevant d'observations visuelles, de mesures instrumentales, déduites ou de données issues du dossier de conception-réalisation de l'ouvrage (Figure 22).

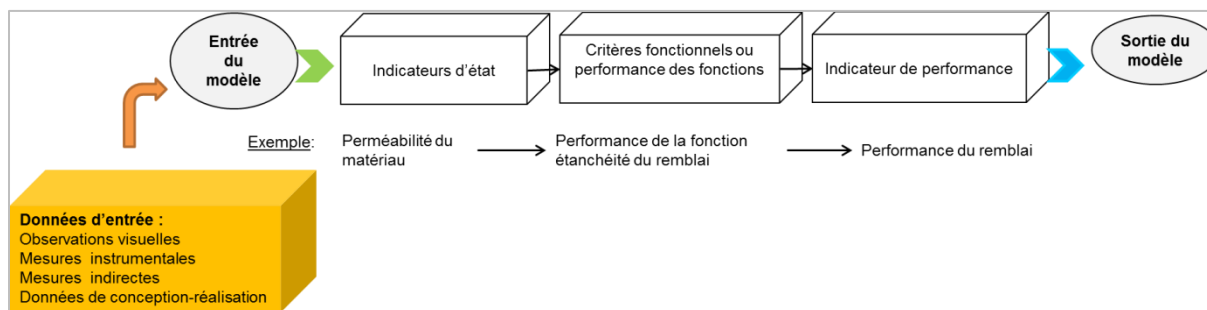


Figure 22. Structure hiérarchique des modèles développés par Curt (2008) et Vuillet (2012)

Nous cherchons dans un premier temps à compléter, avec des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente, les indicateurs d'état listés pour les digues ou bien formalisés pour les barrages. Afin de déterminer ces indicateurs nous avons déployé les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement, en nous focalisant sur l'élément extérieur « végétation arborescente ». Les méthodes mises en œuvre sont une Analyse Fonctionnelle (AF) et une Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE).

Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement ont été utilisées dans le cadre des ouvrages hydrauliques en remblai à charge temporaire (Serre, 2005; Vuillet, 2012) et à charge permanente (Figeac, 2003), afin de construire un modèle fonctionnel permettant de représenter et comprendre l'enchaînement des défaillances vis-à-vis d'un mécanisme de détérioration tel que l'érosion interne ou l'affouillement. L'organisation de la démarche pour la modélisation fonctionnelle des ouvrages hydrauliques peut être résumée de la manière suivante :

- L'analyse fonctionnelle du système permettant d'identifier, de formaliser et d'étudier les fonctions de l'ouvrage et de ses composants ;
- L'analyse des modes de défaillance, de leurs causes et de leurs effets permet de recenser les défaillances susceptibles d'empêcher ou d'altérer les fonctions du système, leurs causes, leurs effets et les indicateurs associés ;
- Les méthodes du raisonnement qualitatif permettent de représenter les défaillances du système sous forme de graphes causaux.

Dans notre cas, nous nous intéressons à la phase de génération des indicateurs, nous utiliserons donc une AF et une AMDE.

A partir de ces résultats qualitatifs, il s'agit de proposer des modèles quantitatifs d'évaluation de la performance. Ceux-ci ont été construits à partir de séances de recueil et formalisation des connaissances.

Les modèles d'évaluation de la performance sont repris, améliorés, complétés et adaptés, notamment par la volonté de prise en compte de l'aspect « *végétation arborescente* » et de formalisation des indicateurs dans le cas des digues. Des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborée sont proposés. Or, l'évaluation de certains de ces indicateurs peut être difficile s'il n'existe pas de méthodes instrumentales connues ou si l'observation visuelle est impossible (typiquement l'objet de la mesure est à l'intérieur de l'ouvrage), c'est le cas de l'indicateur d'état « *Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu*<sup>4</sup> ». Ainsi, une méthodologie permettant un apport de connaissances supplémentaires est proposée. Nous développons des mesures indirectes permettant d'appréhender l'état de décomposition des racines ligneuses d'un individu, notamment à partir du suivi de l'évolution chimique des racines par spectrométrie proche infrarouge (SPIR). Ces différentes étapes permettront à terme de formaliser l'indicateur d'état.

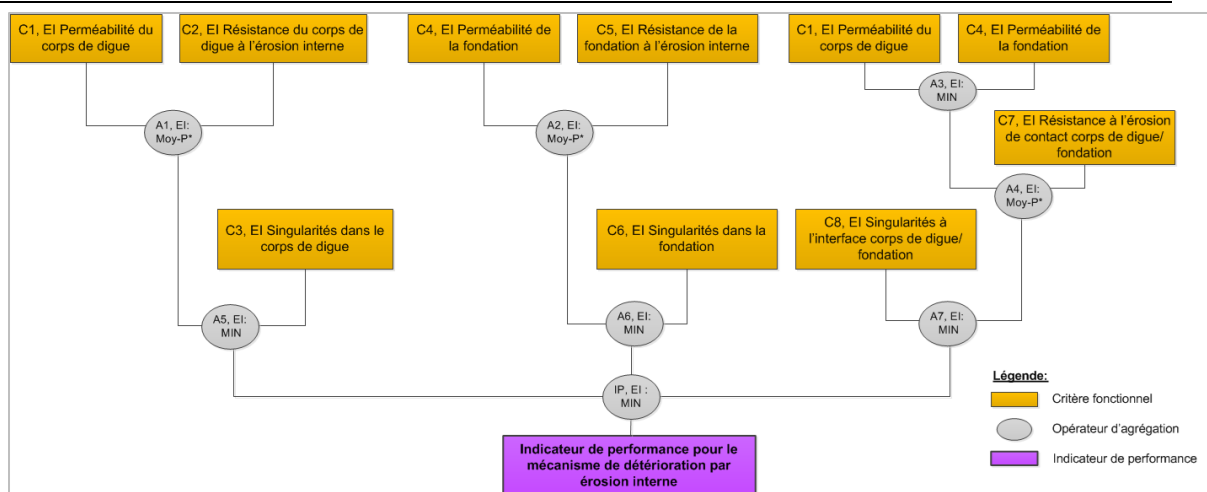
### *1.1. Evaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai à charge temporaire*

Afin de construire nos modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne ou par affouillement du fait de la présence de végétation arborescente, nous nous basons sur les modèles d'évaluation de la performance des digues fluviales en remblai homogène développés par Vuillet (2012). Il s'est focalisé au cours de ses travaux sur la formalisation et l'agrégation des critères fonctionnels pour l'évaluation de chaque indicateur de performance vis-à-vis des différents mécanismes de détérioration.

Pour l'évaluation de la performance des digues fluviales en remblai homogène vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne, huit critères fonctionnels sont nécessaires (nous notons C pour critère et EI pour érosion interne). Ces critères fonctionnels permettent d'évaluer chaque composant de l'ouvrage : le corps de digue, la fondation et l'interface corps de digue – fondation. Le corps de digue est par exemple évalué à l'aide de trois critères fonctionnels : **C1, EI « Perméabilité du corps de digue »**, **C2, EI « Résistance du corps de digue à l'érosion interne »**, **C3, EI « Singularités dans le corps de digue »**. Ces critères fonctionnels sont agrégés par des opérateurs mathématiques : une moyenne pondérée (Moy-P\*) ou un minimum (MIN) (Figure 23).

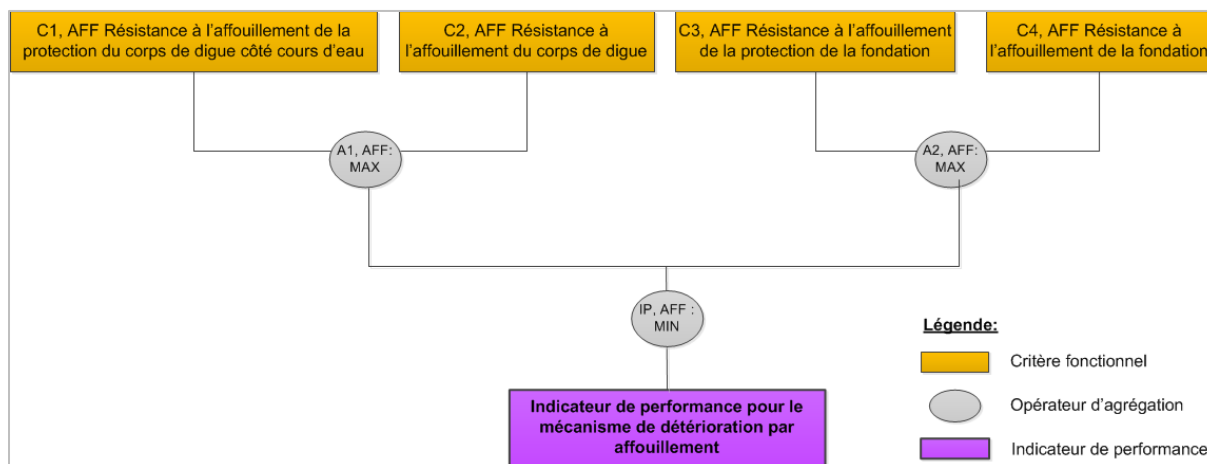
---

<sup>4</sup> Nous nommons indistinctement par le terme « individu » les arbres vivants et les souches mortes.



**Figure 23. Structure d'agrégation pour l'évaluation d'un indicateur de performance d'une digue fluviale vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne (Ci = critère ; EI= érosion interne ; Ai = agrégation ; IP= indicateur de performance ; MIN = minimum ; Moy-P\* = moyenne pondérée)**

Pour l'évaluation de la performance des digues fluviales en remblai homogène vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement, quatre critères fonctionnels sont nécessaires (nous notons C pour critères et AFF pour affouillement). Contrairement au mécanisme de détérioration par érosion interne, l'évaluation de la performance de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'affouillement nécessite d'évaluer seulement deux composants de l'ouvrage : le corps de digue et la fondation. Le corps de digue est par exemple évalué par **C1, AFF « résistance à l'affouillement de la protection du corps de digue côté cours d'eau »** et **C2, AFF « résistance à l'affouillement du corps de digue »**. Ces critères fonctionnels sont agrégés par des opérateurs mathématiques : un maximum (MAX) ou un minimum (MIN) (Figure 24).



**Figure 24. Structure d'agrégation pour l'évaluation d'un indicateur de performance d'une digue fluviale vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement (Ci = critère ; AFF= affouillement ; Ai = agrégation ; IP= indicateur de performance ; MAX = maximum ; MIN = minimum)**

Les critères fonctionnels sont évalués par l'ingénieur sur une échelle de d'évaluation double qui se caractérise par une échelle qualitative permettant l'ordonnancement des catégories en fonction d'un critère d'intensité et une échelle d'intervalle qui permet de travailler sur des grandeurs numériques continues (Figure 25).





**Figure 25. Echelle d'évaluation double retenue pour l'évaluation de la performance des digues de protection fluviale (Vuillet, 2012)**

Dans ses travaux, Vuillet (2012) avait identifié différents indicateurs d'état associés aux critères fonctionnels correspondants. Ces indicateurs d'état n'ont cependant pas été formalisés. La liste d'indicateurs d'état permet simplement aux utilisateurs de les aider dans l'évaluation des critères fonctionnels.

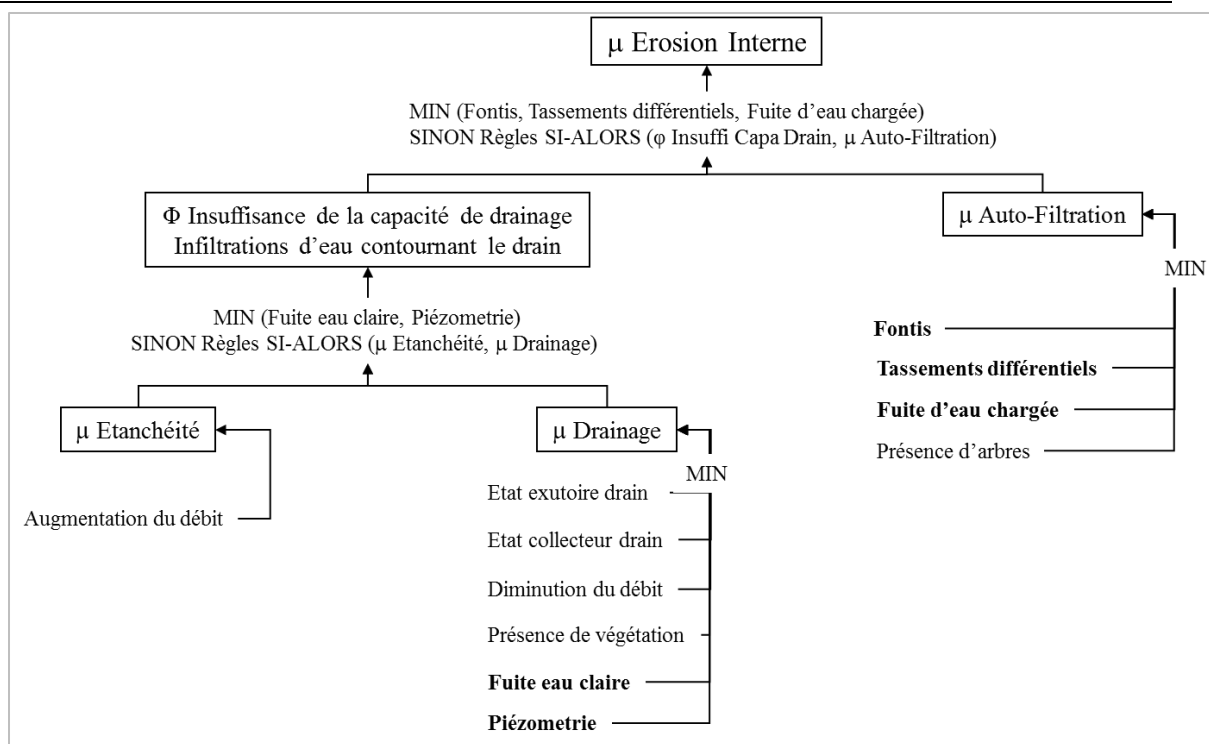
Nous maintenons cette structure hiérarchique pour la construction de nos modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente mais nous formalisons les indicateurs d'état et leur structure d'agrégation afin d'évaluer la performance de l'ouvrage au niveau le plus bas du modèle. Tous les indicateurs sont concernés et a fortiori les indicateurs caractérisant la végétation. C'est ce point d'amélioration que nous cherchons à apporter au modèle précédemment établi.

L'intérêt de la formalisation des indicateurs d'état est d'éviter les problèmes de répétabilité ou de reproductibilité de l'évaluation (Curt et al., 2010). En effet, les indicateurs n'étant pas décrits notamment par une définition mais l'étant seulement par un nom, chacun peut donner à cet indicateur, une interprétation différente : il n'y a aucune garantie que la dimension évaluée soit la même pour chaque évaluateur. Par ailleurs si aucune échelle de notation décrivant le champ possible connu des notes pour cet indicateur, chaque évaluateur crée sa propre échelle de notation qui ne couvre que l'étendue des cas qu'il aura rencontrés ou dont il aura pris connaissance. La formalisation des indicateurs d'état et de leurs agrégations est réalisée à l'aide des méthodes de recueil et de la formalisation des connaissances.

*Notre démarche permet finalement de réduire les problèmes de répétabilité ou de reproductibilité lors de l'évaluation des critères qui était réalisée uniquement à dire d'experts selon un mode « boîte noire » à partir d'indicateurs d'état non formalisés. Pour ces indicateurs qui n'étaient pas décrits par une définition et par une description du champ possible connu des notes pour chacun d'eux, chacun des évaluateurs pouvait donner à cet indicateur, une interprétation et une évaluation différente. Enfin, il est important de formaliser les agrégations qui permettent le passage des indicateurs d'état à un critère fonctionnel et donc de passer d'un modèle boîte noire à un modèle de type boîte blanche.*

## **1.2. Evaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai à charge permanente**

Le point de départ de notre démarche pour la construction du modèle d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge permanente vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne du fait de la présence de végétation arborescente est basé sur les modèles d'évaluation de la performance des barrages en remblai homogène et leur fondation développés dans Curt (2013, 2008; 2010). La Figure 26 permet d'illustrer la structure du modèle d'évaluation de la performance du remblai pour un barrage homogène équipé d'un drain et d'instruments d'auscultation.



**Figure 26. Modèle hiérarchique pour l'évaluation de l'érosion interne – cas d'un barrage homogène équipé d'un drain et d'instruments d'auscultation [ $\mu$  = performance ;  $\Phi$  = phénomène] (Curt, 2008)**

Les indicateurs sont agrégés par l'opérateur mathématique minimum (MIN) (Figure 26) afin d'obtenir en premier lieu l'évaluation de la performance des fonctions d'étanchéité, de drainage et d'auto-filtration impliqués dans le mécanisme d'érosion interne. Dans un second temps, les agrégations successives des fonctions conduisent à la performance vis-à-vis de l'érosion interne. Certains indicateurs qualifiés de « directs » permettent d'évaluer directement les phénomènes : ainsi, l'indicateur « Fuite » renseigne sur une dégradation de la performance de la fonction de drainage. Si cet indicateur n'est pas activé, des règles SI-ALORS sont mises en œuvre comme par exemple « SI fonction d'étanchéité = 4 ET SI fonction de drainage = 5 ALORS insuffisance de la capacité de drainage = 5 ».

Les indicateurs d'état sont évalués sur une seule et même échelle de mesure présentée en Figure 27. Celle-ci est, comme pour l'échelle d'évaluation de la performance des digues fluviales (Figure 25), une échelle d'évaluation double.

Inacceptable	Mauvais			Médiocre		Passable		Bon		Excellent
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

**Figure 27. Echelle d'évaluation double retenue pour l'évaluation de la performance des barrages (Curt, 2008)**

Or, la présence de végétation arborescente n'avait été prise en compte que très partiellement dans ces modèles. Nous nous attachons donc à développer des indicateurs d'état spécifiques afin d'améliorer ces modèles. Les méthodes employées pour l'identification de ces indicateurs sont identiques à celles utilisées pour les digues fluviales.

D'autre part, les modèles d'évaluation de la performance développés par Curt (2008) étaient destinés à l'évaluation de barrages en remblai équipés de système de drainage et d'instruments d'auscultation. Or, les petits barrages en remblai auxquels nous nous intéressons ne sont pas toujours

bien équipés. Différents cas peuvent être rencontrés, différentes combinaisons « étanchéité », « drainage », « instruments d'auscultation » étant possibles même si non conformes aux règles de l'art. L'amélioration que nous apportons aux travaux précédents est la capacité d'adaptation d'un modèle d'évaluation en fonction du cas de barrage rencontré. Nous proposons ainsi une modélisation sous la forme de modules qu'il est possible d'assembler pour s'adapter au barrage étudié.

## ***2. Méthodologie générale adoptée pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente***

La mise en œuvre générale de notre méthodologie est basée sur l'utilisation de méthodes de la sûreté de fonctionnement et sur des séances de recueil et de formalisation des connaissances auprès d'un groupe de trois ingénieurs reconnus experts auprès du ministère de l'environnement sur la base de leur savoir et savoir-faire qui caractérise l'expertise (Zwingelstein, 1995). Chaque étape de construction de nos modèles est réalisée avec l'appui de ce groupe d'expertise (partie gauche de la Figure 28) :

- identification des indicateurs d'état, notamment les indicateurs spécifiques à la végétation arborescente ;
- formalisation des indicateurs d'état non formalisés ;
- agrégation des indicateurs d'état pour l'obtention des critères fonctionnels (ou la performance des fonctions) ;
- agrégation des critères fonctionnels (ou des performances des fonctions) pour l'obtention d'un indicateur de performance ;
- validation des modèles sur des cas tests et des cas réels.

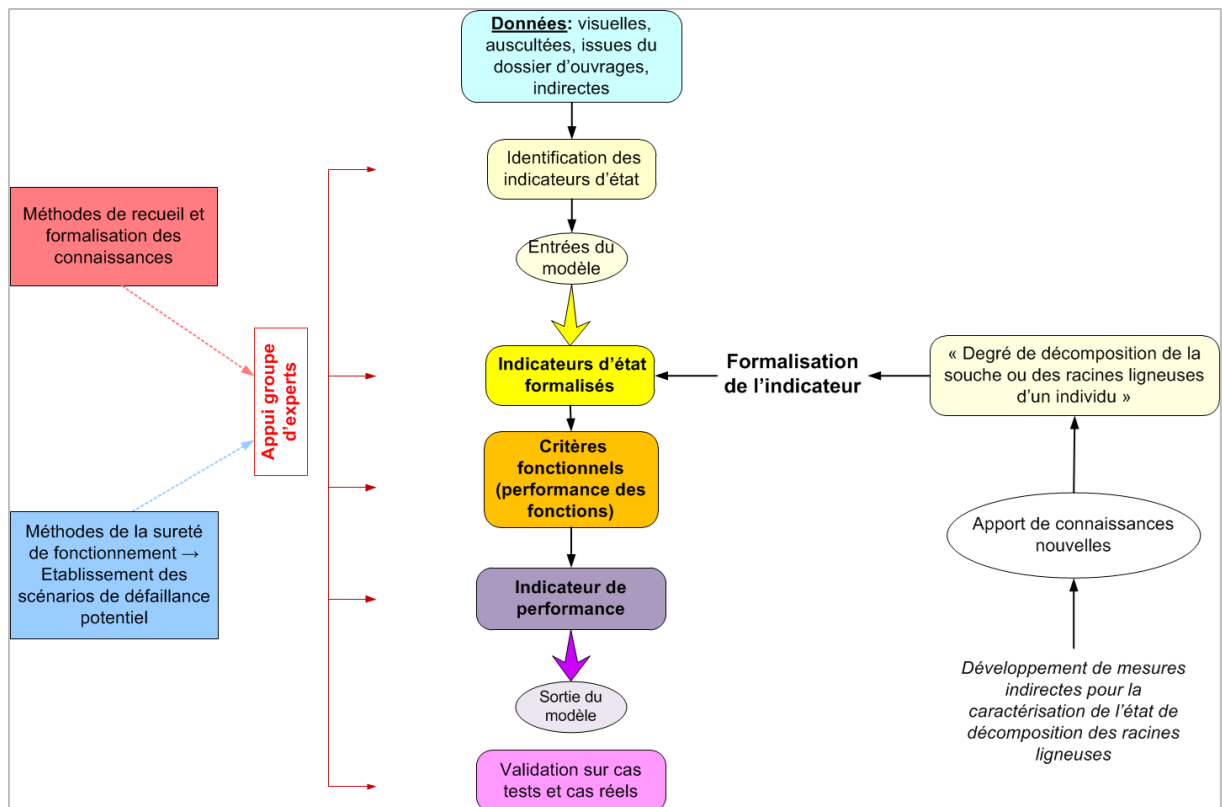


Figure 28. Méthodologie générale proposée dans la thèse

La méthodologie générale est détaillée dans les sections suivantes.

## ***Chapitre 2. Identification et formalisation des indicateurs d'état pour les modèles d'évaluation de la performance***

La variable de base des modèles est constituée par les *indicateurs d'état*. Ces indicateurs d'état sont des données formalisées nécessaires à l'évaluation de la performance d'un ouvrage hydraulique vis-à-vis d'un mécanisme de détérioration. Ce chapitre présente dans un premier temps la méthodologie que nous avons adoptée pour **identifier les indicateurs d'état spécifiques** à la végétation arborescente. Il se focalise ensuite sur **la formalisation de l'ensemble des indicateurs d'état** qui permet aux ingénieurs d'utiliser les modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente de manière répétable et reproductible.

### ***1. Identification des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente***

Les modèles préexistants d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai à charge temporaire (Vuillet, 2012) ou permanente (Curt, 2008) ne prenaient que partiellement en compte l'élément extérieur « végétation arborescente ». Dans les deux types de modèles cet élément se limitait à un indicateur unique « *Présence d'arbres* », ou prenaient en compte la végétation dans la description de l'indicateur d'état du collecteur de drainage (pour les barrages). Nous cherchons donc à identifier les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente. Pour cela, nous déployons les méthodes de la sûreté de fonctionnement. Deux de ces méthodes sont mises en œuvre : une analyse fonctionnelle (AF) et une Analyse des Modes de Défaillance et de leur Effets (AMDE). La finalisation de l'identification de ces indicateurs d'état a été réalisée après recueil de l'avis du groupe d'expertise.

L'analyse fonctionnelle (AF) est une démarche qui consiste à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions d'un système. L'AF permet dans un premier temps d'identifier, la ou les fonction(s) que doit posséder le système global vis-à-vis des contraintes extérieures : c'est l'**analyse fonctionnelle externe**.

Une **analyse fonctionnelle interne** est ensuite réalisée. Elle est généralement précédée d'une **analyse structurelle** qui permet de décomposer le système en différents sous-systèmes suivant l'échelle de granularité à laquelle nous souhaitons travailler. Dans le cadre de l'application des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement aux ouvrages hydrauliques, nous nous plaçons, dans la plupart des cas, à une échelle de granularité de type intermédiaire c'est-à-dire à l'échelle des composants comme par exemple la crête, le remblai, la fondation... Ce découpage est réalisé en fonction des besoins de l'étude. L'analyse fonctionnelle interne identifie, finalement, les différentes fonctions résultant des relations entre chaque composant et les milieux extérieurs. Elle permet ainsi de formuler les fonctions de chaque composant : fonction de contact et de flux (Zwingelstein, 1996).

A la suite de l'analyse fonctionnelle, l'AMDE permet d'examiner les modes de défaillance, leurs effets et leurs causes possibles au niveau de chaque composant. Elle permet également d'identifier les indicateurs des causes et des effets des défaillances des différents composants. C'est une méthode inductive qui considère systématiquement l'un après l'autre, chaque composant du système.

Généralement, les résultats de l'AF et de l'AMDE sont présentés sous forme de tableaux.

Le Tableau 3 présente un extrait du tableau AMDE réalisé par Vuillet (2012).

**Tableau 3. Extrait du tableau AMDE appliquée aux digues fluviale en remblai homogène (Vuillet, 2012)**

Composant	Fonction	Mode de défaillance	Causes	Indicateurs	Effets	Indicateurs
<b>Corps de digue</b>	<b>Limiter les flux hydrauliques</b>	La fonction est dégradée ou est défaillante	<b>Flux hydrauliques</b> (durée de la sollicitation) <b>Processus conception-réalisation</b> (composition, géométrie)	Durée de la crue  Matériau perméable Largueur du corps de digue	<b>Flux hydrauliques</b> Eaux d'infiltration dans le corps de digue	Traces d'humidité / fuites

Nous utilisons la même structuration pour notre tableau AMDE, avec l'objectif d'identification des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente.

Afin de les identifier, nous avons déployé une analyse fonctionnelle et une AMDE en nous focalisant sur l'élément extérieur « végétation arborescente ». L'AF identifie les fonctions de résistance que doit posséder un ouvrage hydraulique vis-à-vis des contraintes liées à la présence de végétation arborescente. L'AMDE fournit les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente qui sont issus des indicateurs des causes et des effets des défaillances. Le groupe d'expertise a, in fine, établi et validé le nom de ces indicateurs. Nous complétons ainsi les résultats de Vuillet (2012) et Figeac (2003).

## 2. Formalisation des indicateurs d'état

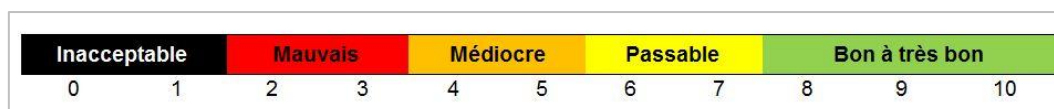
Après avoir identifié les indicateurs spécifiques à la végétation arborescente, il s'agit de formaliser l'ensemble des indicateurs qui permettront d'évaluer les critères fonctionnels (ou les performances des fonctions) relatifs à l'évaluation de la performance d'un ouvrage hydraulique vis-à-vis d'un mécanisme de détérioration.

Pour les deux types d'ouvrages hydrauliques en remblai, les indicateurs d'état proposés résultent d'une ou plusieurs observations visuelles, mesures instrumentales, issues du dossier de conception-réalisation et/ou indirectes. Un indicateur d'état a été défini par Curt & al. (2010) comme une « information ou une donnée formalisée de manière à rendre son utilisation répétable et reproductible ». L'objectif de la formalisation est d'obtenir une description non ambiguë des mesures et des évaluations. Il a été montré qu'une grille en 6 champs permettait d'atteindre cet objectif (Curt et al., 2001) : nom de l'indicateur, définition, mode opératoire, échelle de mesure et références (différents états possibles de l'indicateur), caractéristiques spatiales (lieu d'échantillonnage, lieu de la mesure) et caractéristiques temporelles (pas de temps de la mesure de l'indicateur et analyse de la tendance de cette mesure). Le mode opératoire précise le type de données utilisées par l'indicateur d'état et le protocole utilisé pour l'évaluation de cet indicateur (Tableau 4).

**Tableau 4. Champs de la grille de formalisation des indicateurs d'état** (Curt et al., 2001)

Nom	
Définition	
Mode opératoire	
Echelle et références	
Caractéristiques de lieu	
Caractéristiques de temps	

L'étape de formalisation des indicateurs nécessite de choisir une échelle de mesure ainsi que des références sur cette échelle. Nous proposons d'utiliser une échelle d'évaluation double à l'instar des modèles précédents. Par contre, nous choisissons d'uniformiser cette échelle pour les ouvrages hydrauliques en remblai à charge permanente et à charge temporaire (Figure 29). Tous les indicateurs sont évalués sur cette échelle. Le choix d'une échelle unique entraîne une vigilance particulière quant à la cohérence entre les différents indicateurs. Ceci conduit à un effet de hiérarchisation par rapport à la fonction : cette hiérarchisation apparaît sur la longueur de l'échelle qui est potentiellement parcourue par l'indicateur. Les références sont les points d'ancrage sur l'échelle : elles aident l'évaluateur en lui permettant d'identifier catégories ou intensités.



**Figure 29. Echelle d'évaluation double harmonisée retenue pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente**

Certains des indicateurs d'état ne peuvent pas toujours être évalués par l'utilisateur du modèle. Ceci est fréquemment le cas pour l'indicateur direct « Fuites, indices de fuites » pour l'évaluation des digues de protection. En effet, les digues de protection n'étant pas en charge permanente il est difficile d'affirmer lors d'une visite de terrain (hors période de crue) qu'il n'y a pas de fuites sur l'ouvrage. L'utilisateur note alors « NR » (Non Renseigné) pour l'indicateur. Généralement ce type de notation (NR) n'est utilisé que dans le cadre des indicateurs d'état directs et n'entache pas l'utilisation du modèle. Par contre, l'absence de donnée de conception-réalisation pour les indicateurs d'état nécessitant ce type d'informations peut être préjudiciable pour l'utilisation du modèle.

Afin de formaliser chacun des indicateurs d'état, des séances de recueil et de formalisation collectives des connaissances auprès du groupe d'experts ont été organisées. La démarche consiste à réaliser un transfert des connaissances du groupe d'experts, vers la personne chargée du recueil. Trois phases principales sont nécessaires :

- phase 1 : préparation du recueil ;
- phase 2 : recueil et formalisation des connaissances ;
- phase 3 : mise en forme et vérification des formalisations.

La première phase consiste à préparer les séances de recueil partir de la littérature existante. Pendant cette étape, la personne en charge du recueil se familiarise avec les informations liées à l'indicateur à formaliser et acquiert les termes techniques communément employés pour caractériser

l'indicateur. Ceci permet de faciliter la relation future avec les experts qui seront interviewés et d'augmenter l'efficacité des séances de recueil.

La deuxième phase correspond au recueil et à la formalisation des connaissances lors de séances collectives. La formalisation des indicateurs d'état passe par l'obtention d'un consensus entre les experts et la gestion des problèmes de vocabulaire éventuels.

La troisième phase est une phase de vérification. Nous avons procédé en trois temps ; une première vérification est menée par la personne en charge du recueil. Elle met au propre les connaissances recueillies auprès du groupe d'experts (3 ingénieurs reconnus experts auprès du ministère de l'écologie) et remplit la grille de formalisation correspondant à chaque indicateur. Une vérification de la cohérence de la formalisation de chaque indicateur est réalisée. A la séance suivante les indicateurs formalisés sont présentés au groupe d'experts, qui sont alors susceptibles d'apporter les premières modifications. Une seconde vérification consiste à effectuer au cours des séances d'expertise ou en entretien individuel avec chacun des experts des simulations (cas simplifiés). Les simulations permettent de vérifier à un premier niveau la cohérence de la formalisation des indicateurs. Les simulations en groupe sont l'occasion de tester la cohérence des définitions et des ancrages sur l'échelle de notation (références établis à la séance précédente) de chaque indicateur alors qu'individuellement elles permettent de vérifier la reproductibilité et la répétabilité de ces derniers. Enfin, la validation finale des grilles sera faite après un certain nombre d'utilisations de celles-ci sur des cas réels.

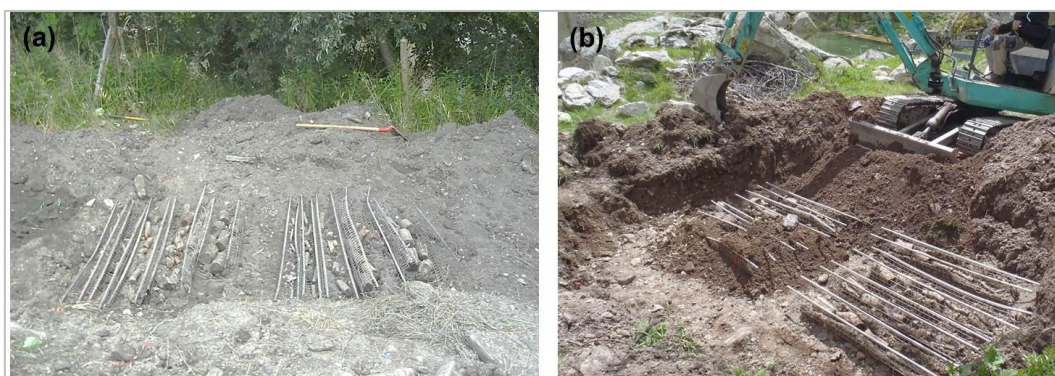


## **Chapitre 3. Développement de mesures indirectes pour l'estimation du degré de décomposition des racines ligneuses**

Afin de formaliser les indicateurs d'état, les informations relatives aux données d'entrée doivent être accessibles (observations visuelles par exemple). Si aucune information n'est disponible comme pour le *degré de composition des racines ligneuses* (l'objet de la mesure est à l'intérieur du système), le développement de mesures indirectes est nécessaire. Ce chapitre présente la méthodologie qui a été développée afin d'obtenir ces informations pour le degré de décomposition des racines ligneuses, qui intervient dans le diagnostic d'un ouvrage vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne.

### **1. Dispositif expérimental**

Afin de suivre l'évolution de la décomposition des racines ligneuses, des dispositifs expérimentaux, contenant des échantillons de racines issus d'arbres fraîchement coupés, ont été mis en place sur des remblais de digues « tests » situées dans différentes zones géographiques (Zanetti et al., 2013). En effet, les conditions climatiques et édaphiques du milieu peuvent faire varier la vitesse de décomposition des racines ligneuses. Trois dispositifs sont actuellement en place : (1) sur les digues de l'Isère (France, Isère) mis en place en 2008 (Figure 30 a), (2) sur la digue de fermeture du barrage de Castérino (France, Alpes Maritimes) mis en place en 2009 (Figure 30 b) et (3) sur les digues de la Durance (France, Vaucluse) mis en place en 2012. Seuls les deux premiers sont exploités dans le cadre de cette thèse.



**Figure 30. Illustration des dispositifs expérimentaux suivis : (a) dispositif expérimental de l'Isère lors du déterrage des échantillons de racines ligneuses après 6 ans de décomposition (photo : Bambara, 2014) et (b) dispositif expérimental de Castérino lors du déterrage des échantillons de racines ligneuses après 4 ans de décomposition (photo : Bambara G., 2013)**

L'évolution de la décomposition des échantillons de racines ligneuses est suivie en fonction de l'espèce de l'arbre dont ils sont issus et pour des racines de diamètres différents. Les échantillons (coupés d'environ 20 cm de longueur) sont disposés dans des paniers en inox et sont enfouis à environ 50 cm de profondeur (Figure 30).

Le dispositif expérimental des digues de l'Isère est composé d'échantillons provenant de quatre espèces ligneuses de feuillus différentes : chêne, frêne, robinier faux-acacia et peuplier. En mai 2008, 10 échantillons de racines par classe de diamètre (3, 5, 8 et 10 cm) et par espèce ont été prélevés, soit au total 160 échantillons (Figure 31) :

- 144 échantillons ont été enfouis sur le site dans 28 paniers en inox ;
- 16 échantillons ont été ramenés au laboratoire afin d'évaluer les caractéristiques du bois sain.

Le dispositif principal est constitué de 16 paniers contenant 6 échantillons de même classe de diamètre, pour chaque espèce (soit 96 échantillons – 24/espèce). Trois dispositifs « test », formés de 1

panier par espèce contenant 1 échantillon de chaque classe de diamètre (Figure 31) – soit 48 échantillons test au total), permettront d'analyser les échantillons en cours de décomposition en laboratoire après chaque campagne de déterrage.

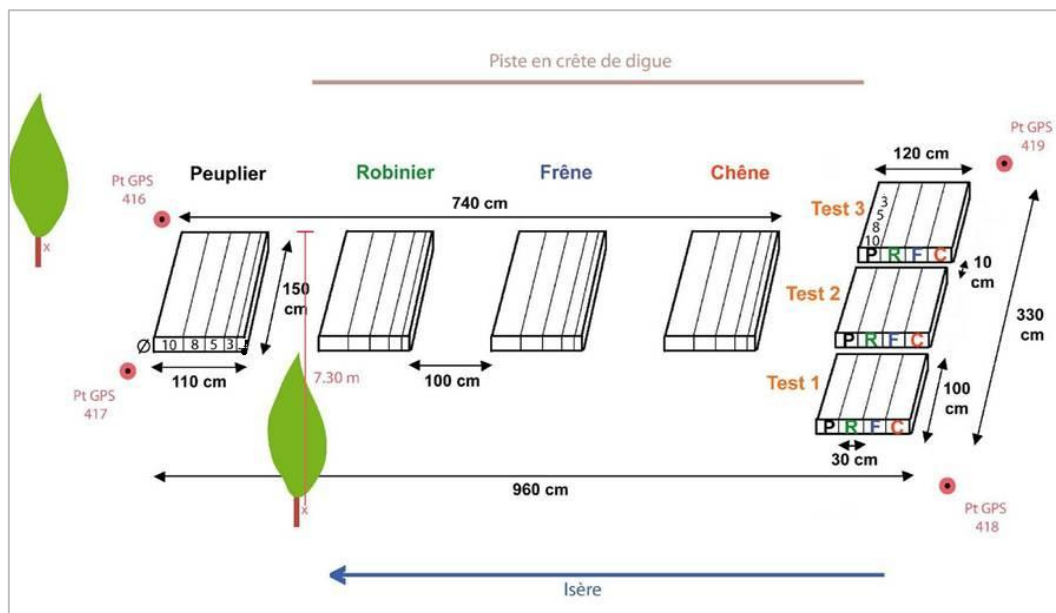


Figure 31. Plan du dispositif sur la digue de l'Isère : organisation des panier et des échantillons (Zanetti, 2010)

Le dispositif expérimental de Castérino est composé d'échantillons provenant de deux espèces de conifères : le pin sylvestre et le mélèze. En juin 2009, 7 échantillons de racines par classe de diamètre (3, 5, 8 et 10 cm) et par espèce ont été prélevés, soit au total 56 échantillons (Figure 32) :

- 48 échantillons (24 par espèce) ont été enfouis sur le site dans 12 paniers en inox contenant 1 échantillon de chaque classe de diamètre ;
- 8 échantillons ont été ramenés au laboratoire afin d'évaluer les caractéristiques du bois sain.

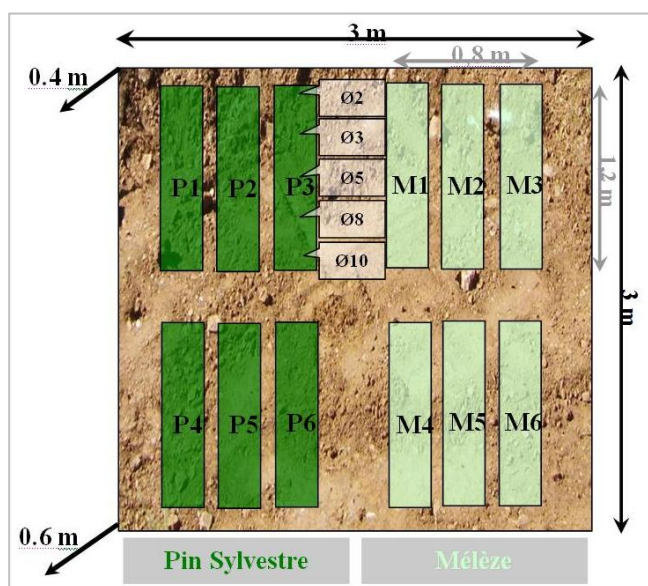


Figure 32. Plan du dispositif sur la digue de Castérino : organisation des paniers et des échantillons (Zanetti, 2010)

Lors de la mise en place des dispositifs expérimentaux un prélèvement des matériaux de la zone d'enfouissement est effectué afin de réaliser une analyse granulométrique et de teneur en matière organique (MO).

Les dispositifs expérimentaux ont été mis en place pour une durée d'environ 10 ans (jusqu'à décomposition supposée quasi complète des échantillons). Des campagnes de déterrage pour chaque dispositif sont organisées tous les deux ans. Au cours de ces campagnes l'ensemble des échantillons est évalué qualitativement sur site et une partie des échantillons (16 échantillons pour le dispositif de l'Isère et 8 échantillons pour le dispositif de Castérino) sont ramenés au laboratoire afin d'être analysés quantitativement. Sur chaque site expérimental, un prélèvement de matériaux est également effectué tous les deux ans.

Le protocole de terrain réalisé à chaque déterrage est le suivant :

- Mise à nu des paniers à l'aide d'une pelle mécanique ;
- Sortie des paniers ;
- Prélèvement de matériaux au cœur de la zone d'enfouissement ;
- Nettoyage de chaque échantillon afin de retirer les excès de terre ;
- Pesée des échantillons sur une balance (+/- 0.1 g) ;
- Evaluation qualitative des échantillons à l'aide des méthodes visuelles et pénétration d'une lame de couteau ;
- Ré enfouissement des échantillons non ramenés au laboratoire.

Ces dispositifs permettent de suivre l'évolution de la décomposition d'échantillons de racines dans des sites géographiques différents pour des espèces ligneuses et des diamètres différents.

Un codage permet d'identifier les échantillons. Celui-ci, comprend l'espèce, le temps (stade) de décomposition et le diamètre.

Afin d'évaluer un biais éventuel entre la vitesse de décomposition d'une racine restée sur souche et d'un échantillon de racine coupée dans l'un de nos dispositifs expérimentaux, nous avons déterré plusieurs souches d'arbre dont la date de coupe était connue. Ces déterrages ont eu lieu sur différents profils des digues de protection contre les crues de l'Isère avec la collaboration de l'AD Isère en août 2013. 11 souches avaient été repérées puis déterrées, nous en avons sélectionné 9 pour notre étude :

- 1 chêne ;
- 4 frênes ;
- 1 peuplier ;
- 3 robiniers ;

Il est important de noter que certaines de ces souches avaient rejeté au moment de leur déterrage, ce qui laisse pressentir que certaines racines étaient toujours vivantes et que la date de coupe n'est pas forcément la date du début de décomposition. Les échantillons disponibles sont répertoriés dans le Tableau 5 suivant :

**Tableau 5. Echantillons de racines reliés aux souches issus de la campagne de déterrage sur les digues de l'Isère en aout 2013**

Espèce végétale	Date de coupe	Rejet ou non de la souche au moment du déterrage	Diamètres relevés
Chêne (1C)	2008	Oui (mais petit arbre)	03 – 05 – 08
Frêne (1F)	2009	Non	03 – 05 – 08 – 10
Frêne (2F)	2009	Oui	03 – 05
Frêne (3F)	2009	Oui	05 – 08
Frêne (5F)	2009	Oui	03 – 05 – 08 – 10
Peuplier (2P)	2008	Oui	03 – 05 – 08 – 10
Robinier (3R)	2008	Oui	03 – 05
Robinier (4R)	2008	Oui	03 – 05 – 08 – 10
Robinier (5R)	2008	Non	03 – 08 – 10

NB/ Les noms de souches (1C, 1F, ...) ont été établis lors de du repérage et déterrage des souches.

Nous n'avons pas effectué les évaluations qualitatives de terrain sur ces échantillons. Cependant, nous n'observons pas un état de décomposition avancé sur ces racines. Cette constatation est due au fait que la plupart des souches ont rejetés.

L'évaluation quantitative par spectrométrie proche infrarouge a été utilisée afin de comparer l'état de décomposition de ces échantillons de racines issus de souches avec les échantillons issus du dispositif expérimental de l'Isère. Nous discutons dans la partie résultat (partie 3, chap.1, section 2.2.3.3) des différences observées.

## ***2. Evaluation qualitative de la décomposition des racines ligneuses in situ***

Lors des campagnes de déterrage, les méthodes identifiées pour l'évaluation qualitative de la décomposition des racines ligneuses (partie 1, chap.2, section 2.2) sont utilisées sur l'ensemble des échantillons, soit :

- L'évaluation qualitative du bois par des critères visuels et tactiles (Tableau 6) ;

**Tableau 6. Classe de décomposition des racines ligneuses à partir de critères visuels et tactiles** (Sandström et al., 2007; Tobin et al., 2007)

Classe de décomposition	Description des classes
<b>1</b>	Ecorce intacte, peu de signes de dégradations (petits trous, craquellement), racines peu flétries
<b>2</b>	Ecorce présente à plus de 50 % quelques morceaux manquants, petites surfaces dégradées
<b>3</b>	Moins de 50 % de l'écorce est présente, fissures, morceaux manquants
<b>4</b>	Peu d'écorce, contour déformé par pertes de gros fragments de bois, aubier manquant
<b>5</b>	Plus d'écorce, bois déformé et fibreux, attaque du bois de cœur (duramen)
<b>6</b>	Etat de sciure, effondrement de la structure, impossible à manipuler

- L'évaluation qualitative du bois par test de résistance à la pénétration de la lame d'un couteau (Tableau 7).

**Tableau 7. Classe de décomposition des racines ligneuses à partir d'un critère de résistance à la pénétration d'un lame dans le bois** (Renvall, 1995).

Classe de décomposition	Description des classes
<b>1</b>	Bois dur, lame du couteau pénètre juste de quelques millimètres dans le bois
<b>2</b>	Bois assez dur, la lame du couteau pénètre de 1 à 2 cm dans le bois
<b>3</b>	Bois assez mou, la lame du couteau pénètre facilement dans le bois (la moitié de la lame)
<b>4</b>	Bois mou, le tronc est déformé, la lame entière du couteau pénètre facilement dans le bois

Tous les échantillons sont également pesés afin de relever leur poids frais. Cette information a assez peu de signification dans l'absolu, sachant que le poids frais des échantillons peut varier en fonction des conditions climatiques des jours précédents le déterrage (humidité, sécheresse du sol, ...). Il donne par contre une indication a posteriori, après séchage de l'échantillon, sur la quantité relative d'eau ayant imbibé la racine, et donc sur sa porosité et son imprégnabilité, qui augmentent au fur et à mesure de la décomposition.

Actuellement trois campagnes de déterrage ont eu lieu sur le dispositif de l'Isère et deux sur le dispositif de Castérino.

La Figure 33 illustre la campagne de déterrage des échantillons du dispositif expérimental de Castérino effectué en mai 2013 soit après 4 ans de décomposition.





**Figure 33. Déterrage du dispositif de Castérino après 4 ans de décomposition (a) nettoyage de chaque échantillon avant d'effectuer les analyses qualitatives (b) évaluation visuelle et tactile de chaque échantillon à l'aide des différentes classes de décomposition (Sandström et al., 2007; Tobin et al., 2007)(c) évaluation de la résistance à la pénétration de la lame de couteau (Renvall, 1995) (Photo : Bambara G., 2013)**

La Figure 34 illustre la campagne de déterrage du dispositif expérimental de l'Isère effectué en juin 2014, soit après 6 ans de décomposition.



**Figure 34. Déterrage du dispositif expérimental de l'Isère après 6 ans de décomposition (a) déterrage des paniers à la pelle mécanique (b) pesée des échantillons frais (c) évaluation visuelle et tactile de chaque échantillon à l'aide des différentes classes de décomposition (Sandström et al., 2007; Tobin et al., 2007) et description de chaque échantillons (photo : Bambara G., 2014)**

Les données recueillies sont analysées afin de comparer l'évolution de la décomposition dans le temps en fonction de l'espèce, du diamètre et du lieu géographique où est implanté le dispositif expérimental.

### ***3. Evaluation quantitative de la décomposition des racines ligneuses en laboratoire***

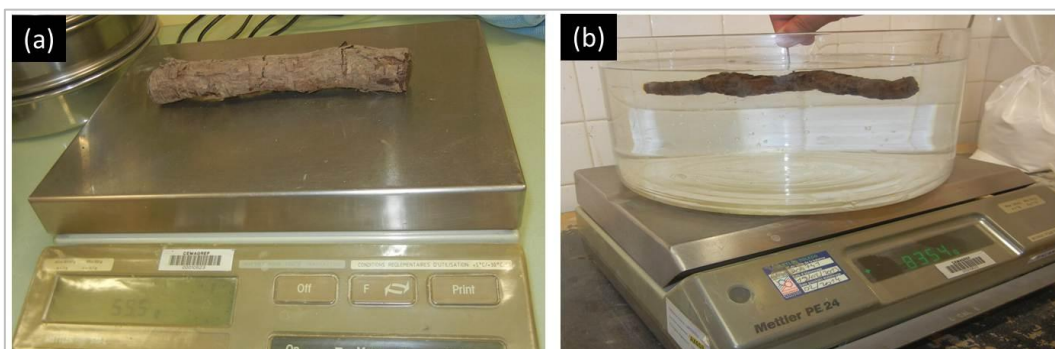
Les analyses quantitatives menées au laboratoire après chaque récolte d'échantillons concernent l'évolution de leur densité (estimation par déplacement d'eau) et l'évolution de leurs caractéristiques chimiques par spectrométrie proche infrarouge (SPIR).

Préalablement à ces mesures, les échantillons sont séchés à température ambiante (environ 25°C) pendant environ 2 mois jusqu'à stabilisation de leur poids sec. Actuellement, nous disposons au laboratoire pour les deux sites expérimentaux, d'échantillons représentatifs de différents stades de décomposition :

- Pour le dispositif expérimental de l'Isère nous disposons d'échantillons à quatre stades différents : T0 (échantillons témoins, non décomposés), T2 (échantillons à 2 ans de décomposition), T4 (échantillons à 4 ans de décomposition) et T6 (échantillons à 6 ans de décomposition).
- Pour le dispositif expérimental de Castérino nous disposons d'échantillons à trois stades de décomposition différents : T0 (échantillons témoins, non décomposés), T2 (échantillons à 2 ans de décomposition), T4 (échantillons à 4 ans de décomposition).

#### ***3.1. Evaluation de la perte de densité des échantillons de racines ligneuses au cours de leur décomposition***

Afin d'évaluer la perte de densité de nos échantillons au cours de leur décomposition, nous avons choisi d'utiliser la méthode par déplacement d'eau. Cette mesure est notre mesure de référence qui nous permettra de caler le modèle d'évolution de la décomposition des racines ligneuses par SPIR. Nous réalisons la mesure de la densité sur les échantillons de racines sèches et préalablement écorcées. La mesure est répétée trois fois sur chaque échantillon afin de moyenniser les résultats obtenus et vérifier ainsi la reproductibilité de la méthode. Un même échantillon est séché entre deux mesures (séchage d'une nuit à l'étuve 70°C). La Figure 35 illustre le protocole utilisé pour l'estimation de la densité d'un échantillon. La densité est obtenue en effectuant le rapport entre le poids sec de l'échantillon et le volume déplacé.



**Figure 35. Illustration du protocole d'estimation de la densité d'un échantillon par déplacement d'eau (a) pesée de l'échantillon sec (b) pesée de l'échantillon immergé dans l'eau du cristallisateur (photo : Bambara G., 2013)**

#### ***3.2. Evaluation de l'évolution chimique des échantillons de racines ligneuses au cours de leur décomposition***

Afin de suivre l'évolution chimique des échantillons de racines enfouis dans nos deux dispositifs expérimentaux, ainsi que sur nos échantillons de racines issus de souches, nous avons choisi d'utiliser

la spectrométrie proche infrarouge (SPIR) qui fournit un spectre représentant une empreinte ou signature chimique globale de l'échantillon. Les outils chimiométriques permettent ensuite de caractériser puis de prédire la classe de décomposition, l'espèce et le diamètre d'un échantillon inconnu.

### 3.2.1. Préparation des échantillons

L'utilisation de la SPIR nécessite de réduire les échantillons de racines à l'état de poudre. Après avoir relevé la densité de chaque échantillon, la poudre de bois est obtenue en deux étapes :

- Broyage des échantillons avec un broyeur planétaire (Fritsh, planetary mill, pulverisette 5). Les échantillons sont préalablement sciés en rondelle puis découpés avec un sécateur en morceaux afin de faciliter le broyage (Figure 36) ;



Figure 36. Illustration du protocole de broyage (a) obtention de rondelles fines (b) broyage des morceaux de racines dans broyeur planétaire (c) sciure obtenue (photo : Bambara G., 2013)

- Tamisage des sciures broyées pour l'obtention d'une granulométrie inférieure à  $315\mu\text{m}$ . Deux tamis sont utilisés : l'un de  $1\text{ mm}$  et l'un de  $315\mu\text{m}$ . La sciure de granulométrie inférieure à  $315\mu\text{m}$  est récupérée et placée dans un sachet hermétique dans l'attente de son passage en SPIR (Figure 37).



Figure 37. Tamisage des échantillons de racines préalablement broyés : illustration des refus de tamis et obtention d'une sciure de granulométrie inférieure à  $315\mu\text{m}$  (à gauche) (photo : Bambara G., 2013)



Ce protocole de préparation des échantillons de racines a pour but de diminuer les effets physiques liés à la granulométrie des sciures lors de l'acquisition des spectres.

### 3.2.2. Spectrométrie proche infrarouge (SPIR)

L'appareil utilisé pour nos échantillons de racines est le spectromètre Antaris II FT-NIR, Thermo-Nicolet (Figure 38). L'ANNEXE 1 présente le principe d'un spectromètre proche infrarouge.



**Figure 38. Spectromètre Antaris II FT-NIR, Thermo-Nicolet du laboratoire LISA-METICA, Université Aix-Marseille (photo : Bambara G., 2013)**

Le spectromètre Antaris II FT-NIR fonctionne en réflexion diffuse. Celle-ci apparaît lorsque la l'énergie lumineuse qui pénètre une ou plusieurs particules est réfléchiée dans toutes les directions. La collecte de la lumière diffusée s'effectue par le biais d'une sphère d'intégration qui permet d'enregistrer le spectre d'échantillons solides. Ce système est caractérisé par une sensibilité accrue et une meilleure reproductibilité des mesures.

Chacune des analyses a été réalisée selon les paramètres d'acquisition suivants :

- Gamme spectrale :  $10000 - 4000 \text{ cm}^{-1}$  ;
- Résolution :  $4 \text{ cm}^{-1}$  ;
- Nombre de scans : 50 ;
- Gain : 1 ;
- Technique d'échantillonnage : Sphère d'intégration.

Pour chaque échantillon, 50 scans sont effectués. Ils s'enchainent lors de l'acquisition et sont moyennés en un seul spectre final.

Avant chacune des acquisitions, une calibration à vide (background) est effectuée selon ces mêmes paramètres. Elle correspond au spectre de l'air, qui sera ensuite déduit du spectre de l'échantillon. Le temps d'acquisition d'une analyse SPIR est d'environ 2 min.

Pour chaque échantillon, trois spectres moyennés sont acquis. L'acquisition des spectres est pilotée par les logiciels « OMNIC » et « TQ analyst » qui permettent entre autres, l'enregistrement automatique des spectres. Ceux-ci sont exportables vers les logiciels de traitement de données.

Entre chaque analyse, un nettoyage complet de la cellule est effectué afin de ne pas contaminer l'échantillon suivant.

### 3.2.3. Traitements des données : outils chimiométriques

Le traitement chimiométrique des données spectrales est réalisé avec le logiciel Unscrambler 10.1 de chez CAMO (Oslo, Norvège).

Les spectres sont organisés dans une matrice. Les données de départ de la matrice sont les « variables explicatives », ici les absorbances spectroscopiques proche infrarouge. Chaque ligne de ce tableau matriciel correspond à un échantillon et chaque colonne correspond à un nombre d'onde (Tableau 8).

**Tableau 8. Structure d'une matrice de données spectrales**

Echantillons (racines)	Variables : nombre d'onde			
1	$A_{11}$	$A_{12}$	...	$A_{1P}$
2	$A_{21}$	$A_{21}$		$A_{2P}$
...	...	...	$A_{IJ}$	...
N	$A_{N1}$	$A_{N1}$	...	$A_{NP}$

*Afin d'une part, de discriminer nos échantillons de racines entre eux et d'autre part, de prédire pour un échantillon inconnu son stade de décomposition, son espèce et son diamètre, nous proposons d'utiliser respectivement une méthode d'analyse exploratoire : l'analyse en composantes principales (ACP) et une méthode d'analyse prédictive : la méthode des moindres carrés partiels (PLS).*

#### 3.2.3.1. Prétraitement des spectres

Afin d'optimiser la qualité de nos spectres et ainsi éliminer le « bruit » pouvant masquer les informations importantes à prendre en compte lors des traitements ultérieurs, un certain nombre de prétraitements ont été testés sur notre jeu de données tels que :

- La correction de ligne de base qui permet de corriger les effets additifs et ainsi ajuster le décalage des spectres en définissant un point minimum ;
- Une dérivée première ou seconde qui permet de révéler des informations « cachées » sur un spectre ;
- Une SNV (standard Normale Variate) qui permet de diminuer les effets de dispersion des spectres à partir d'un centrage et d'une mise à l'échelle de chaque spectre ;
- Une EMSC (the Extended Multiplicative Scatter Correction) qui est une méthode de transformation qui permet de compenser les effets additifs et multiplicatifs des données spectrales. Ces effets sont alors retirés de la matrice de données pour éviter qu'ils ne dominant l'information.

Après avoir testé les différentes méthodes de prétraitement nous choisissons d'utiliser l'EMSC car elle permet de corriger les effets additifs et multiplicatifs de nos données qui sont dus au fait que nous travaillons sur des échantillons solides et qu'une composante physique est présente sur les spectres. Nous observons sur les spectres bruts un décalage uniforme de l'ensemble des spectres vers le haut (ajout d'un coefficient pondéré sur l'ensemble du spectre – effets additifs) ainsi qu'un décalage de la queue du spectre due aux effets multiplicatifs.

En réalisant une EMSC sur notre matrice, cinq facteurs de correction sont calculés pour chaque spectre par une régression polynomiale du spectre sur le spectre idéal, qui est généralement le spectre moyen de l'ensemble d'étalonnage.

Le modèle EMSC peut s'écrire :

$$x_i = a_i 1 + b_i x_{ref} + h_i k_i + d_i \bar{v} + e_i \bar{v}^2 + \varepsilon_i$$

Où le coefficient  $a_i$  représente l'effet additif,  $b_i$  l'effet multiplicatif,  $d_i$  et  $e_i$  les effets de dispersion de la lumière dépendant de la longueur d'onde,  $h_i k_i$  les effets chimiques,  $\varepsilon_i$  le vecteur contenant le spectre résiduel,  $\bar{v}$  vecteur des nombres d'onde et  $x_{ref}$  le spectre moyen de l'étalonnage.

Les facteurs de correction  $\hat{a}_i$ ,  $\hat{b}_i$ ,  $\hat{h}_i$ ,  $\hat{d}_i$  et  $\hat{e}_i$  sont estimés par une régression des moindres carrés de chaque spectre et chaque spectre est corrigé par l'EMSC comme suit :

$$x_i^* = (x_i - \hat{a}_i - \hat{h}_i k_i - \hat{d}_i - \hat{e}_i^2) / \hat{b}_i$$

Les analyses en composantes principales et les régressions des moindres carrés partiels ont été effectuées sur les spectres prétraités avec une EMSC.

### **3.2.3.2. Analyse en composantes principales (ACP)**

L'analyse en composantes principales (ACP) est généralement utilisée comme une première analyse exploratoire des données afin de détecter des groupes et investiguer la structure même des données (JOLLIFFE, 2002). L'objectif principal est de réduire la dimension du jeu de donnée sans perdre trop d'informations et d'identifier de nouvelles variables sous-jacentes significatives (Wold et al., 1987). Cette méthode vise à structurer et à simplifier les données sans privilégier l'une d'entre elles, c'est pour cela que l'on parle de méthode non supervisée. Ainsi, l'ACP apporte des informations sur les variations du système sans aucun a priori.

Dans le cadre de cette thèse, les grandeurs mesurées sont l'ensemble des absorbances spectrales des domaines de la spectroscopie proche infrarouge. L'ensemble des spectres forme la structure numérique du jeu d'échantillons. A partir de cette structure de données, la méthode ACP va être capable d'organiser les échantillons dans un nouvel espace vectoriel. Les vecteurs de ce nouvel espace sont calculés de manière à expliquer la variance de la structure numérique. Tous les vecteurs calculés sont orthogonaux entre eux et ils sont classés par ordre de variance maximale expliquée. La projection des échantillons selon ces vecteurs permet une interprétation plus aisée de l'ensemble des données.

La matrice de données doit tout d'abord être centrée ou réduite avant d'être appliquée à l'algorithme de l'ACP. Dans notre cas, la matrice a été centrée. L'algorithme NIPALS (Non Linear Iterative Partial Least Square) est ensuite utilisé pour réduire le nombre de dimensions de l'analyse. La première composante principale est la droite pour laquelle les carrés des écarts à la droite sont minimaux. Les critères des moindres carrés conduisent à maximiser les valeurs de projections orthogonales des individus sur cette droite. Les composantes principales solutions sont les vecteurs propres de la matrice de corrélation. Ces vecteurs propres sont classés par ordre de variance maximale et ils constituent un système d'axes orthogonaux. Ils sont alors appelés « composantes principales ».

Ce nouveau système d'axes vectoriels constituera le nouveau référentiel de classement et de représentation graphique des variables. La projection des échantillons dans l'espace des composantes principales permet une représentation graphique et sert en outre à classer ceux-ci en différentes familles, comme l'illustre la Figure 39.

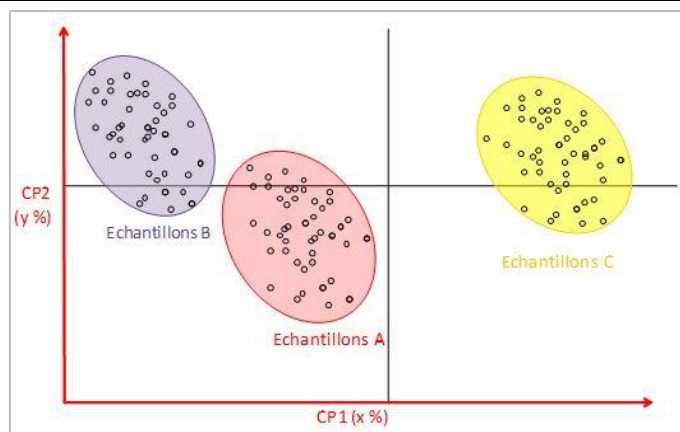


Figure 39. Exemple d'analyse ACP effectuée sur 3 groupes d'échantillons A, B et C (Gaydou, 2010)

Enfin, l'étude détaillée des composantes principales d'un modèle ACP, permet en analysant les différentes propriétés de la variance de relier celle-ci aux zones spectrales correspondantes. Ainsi, l'ACP autorise une lecture aisée d'un jeu complexe de données en reliant les variances à la totalité des variables.

*Nous utilisons cette propriété dans notre étude en reliant les spectres des composantes principales avec les spectres de référence issus des composés purs de lignine, cellulose et hémicellulose. Ceci nous permet d'étudier l'évolution de la composition chimique des racines au cours de leur décomposition.*

### 3.2.3.3. Régression des moindres carrés partiels (PLS)

La régression des moindres carrés partiels (PLS) est une analyse prédictive supervisée qui permet de contourner l'interférence et le chevauchement des données (Fuller et al., 1988). La régression PLS est utilisée pour étudier les relations entre l'intensité spectrale et les caractéristiques des échantillons (Haaland and Thomas, 1988; Martens and Næs, 1989). Les variables dépendantes sont étudiées, individuellement avec une régression PLS1 et par groupes avec une régression PLS2. La méthode de validation croisée est utilisée pour la calibration. Nous utilisons de manière conventionnelle : 2/3 des échantillons pour la calibration et la validation croisée et 1/3 des échantillons pour le test du modèle prédictif.

La méthode PLS-DA est une méthode d'analyse supervisée linéaire qui repose sur l'algorithme de la régression PLS. Cette adaptation de la régression PLS est utilisée pour la classification et la reconnaissance des échantillons. Elle est effectuée en utilisant un code binaire exclusif avec un bit par classe. Ainsi chaque classe est représentée par un nombre, 0 ou 1 selon l'appartenance ou non de l'échantillon à la classe. Les échantillons appartenant à la classe seront classés entre 0.5 et 1.5 et ceux n'appartenant pas à la classe seront compris entre 0.5 et -0.5.

La prédiction des classes de décomposition et des espèces de nos échantillons issus du dispositif de l'Isère ont été effectuées avec des modèles PLS1-DA. Ainsi, nous calibrons 8 modèles de régression PLS-DA :

- un pour la prédiction de chaque temps de décomposition, soit 4 modèles : T0, T2, T4, T6 ;
- un pour la prédiction de chaque espèce, soit 4 modèles : chêne, frêne, peuplier, robinier ;

Nous testons des modèles PLS1-DA pour la prédiction du temps de décomposition des racines issues des souches déterrées en 2013 dont on connaît la date de coupe des arbres.

#### 4. Synthèse sur la méthodologie développée pour l'évaluation de l'état de décomposition des racines ligneuses

Sur la base de dispositifs expérimentaux, plusieurs méthodes permettant d'identifier et de prédire l'état de décomposition des racines ligneuses sont utilisées. La Figure 40 permet de synthétiser la méthodologie employée pour assurer la formalisation de l'indicateur d'état « Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu » sous forme schématique.

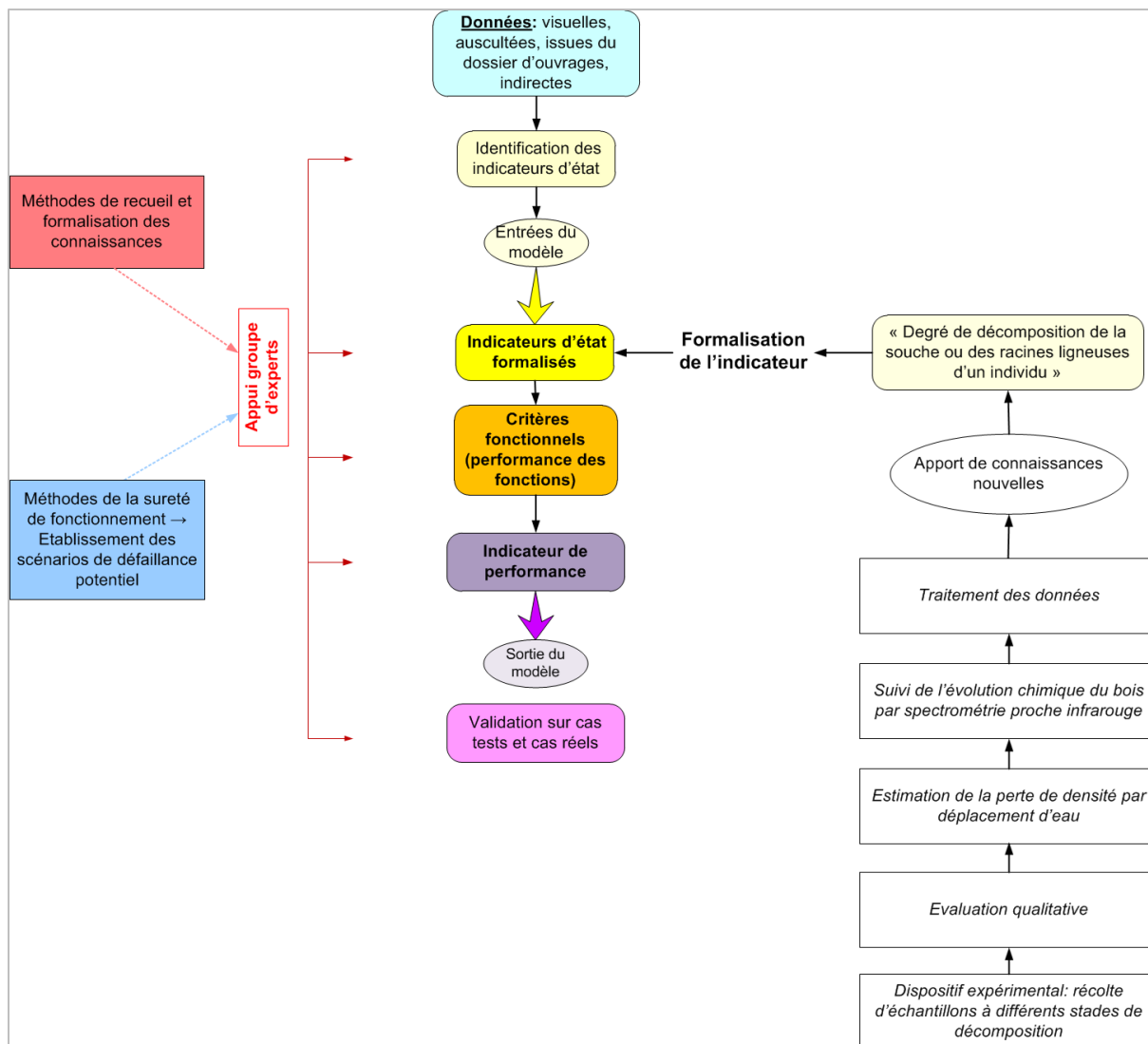


Figure 40. Méthodologie proposé dans la thèse pour le développement de mesures indirectes favorisant l'apport de connaissance sur l'état de décomposition des racines ligneuses

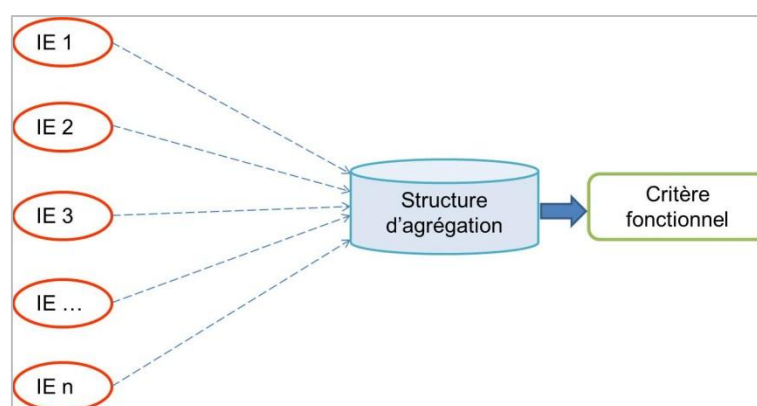
## ***Chapitre 4. Démarche pour la construction des modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente***

Ce chapitre vise à présenter les améliorations et adaptations que nous avons choisies d'effectuer pour la construction des modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente par rapport aux modèles existants.

### ***1. Amélioration du modèle de Vuillet (2012) pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire soumis à la présence de végétation arborescente***

L'identification d'indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente et la formalisation de l'ensemble des indicateurs d'état nécessaires à l'évaluation des critères fonctionnels constitue un premier point d'amélioration du modèle d'évaluation de la performance des digues fluviales développé par Vuillet (2012). A partir de ceux-ci, il est nécessaire de proposer des modèles d'agrégation qui permettront d'évaluer les critères par combinaison des indicateurs.

Ce dernier point d'amélioration passe la **recherche de structures d'agrégation adéquates permettant d'évaluer chaque critère fonctionnel à partir des indicateurs d'état qui leur sont associés**. En dehors du cas des indicateurs d'état directs, comme par exemple pour l'évaluation de la performance des digues fluviales vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne où l'indicateur « *fuites ou indices de fuites* » permet de d'évaluer directement le critère fonctionnel **C1, EI « perméabilité du corps de digue »**, nous définissons des modèles d'agrégation. Ces modèles d'agrégation sont décrits lors des séances de recueil auprès du groupe d'expertise avec lequel nous travaillons. Un modèle d'agrégation est décrit pour chaque critère fonctionnel (Figure 41).



**Figure 41. Evaluation d'un critère fonctionnel à partir des indicateurs d'état associés (IE = Indicateur d'état)**

Comme nous l'avons spécifié dans la partie 1, chap.3, section 2.6, de ce mémoire, nos travaux relèvent du champ des systèmes à base de connaissances (Akerkar and Sajja, 2009; Booker and McNamara, 2004). Ce type de modèle a pour intérêt d'être proche du raisonnement réalisé par les experts que nous cherchons à mimer et d'être lisible pour les futurs utilisateurs.

Des règles d'agrégation des indicateurs d'état de type SI...ALORS sont proposées et sont ensuite synthétisées sous la forme de table de vérité. Des agrégations sont également réalisées à l'aide de

l'opérateur MIN et par un système de dégradation de la note obtenue vis-à-vis d'un indicateur en fonction de la note d'un autre indicateur. Le groupe d'experts propose les agrégations des indicateurs d'état entre eux selon une logique phénoménologique. Ils sont agrégés deux à deux ou avec une combinaison d'indicateurs préalablement agrégés jusqu'à l'obtention de l'évaluation du critère fonctionnel considéré. Le poids attribué à chacun des indicateurs d'état dans les règles d'agrégation établit reflète le raisonnement des experts pour l'évaluation des critères. Ceux-ci sont évalués selon la même échelle que celle utilisée par les indicateurs d'état et présentée sur la Figure 29.

*Finalement nous proposons trois avancées importantes par rapport aux modèles existants :*

- *intégrer des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente dans les modèles d'évaluation de la performance existants vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne et affouillement ;*
- *formaliser l'ensemble des indicateurs d'état nécessaires à l'évaluation de chaque critères fonctionnels ;*
- *proposer des structures d'agrégation des indicateurs d'état pour l'évaluation des critères fonctionnels.*

## ***2. Amélioration et adaptation des modèles de Curt (2008) pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge permanente soumis à la présence de végétation arborescente***

Les modèles d'évaluation de la performance développés par Curt (2008) s'intéressent aux barrages équipés de systèmes de drainage et d'instruments d'auscultation. Or, si l'on s'intéresse aux problématiques liées à la présence de végétation arborescente sur les ouvrages hydrauliques à charge permanente, nous voyons que le type d'ouvrages hydrauliques concerné peut être très varié. En outre, les petits barrages en remblai ne possèdent pas toujours de dispositifs de drainage et d'instruments d'auscultation. Nous avons donc cherché à adapter les modèles existants pour évaluer les différents types d'ouvrages rencontrés.

Contrairement au modèle développé par Vuillet (2012), les modèles d'évaluation de la performance des barrages en remblai homogène et de leur fondation développés par Curt (2008) présentent des indicateurs d'état formalisés.

Pour notre étude, ces modèles sont principalement modifiés par :

- Une prise en compte plus détaillée de la présence de végétation arborée, ce qui comprend l'identification et la formalisation des indicateurs spécifiques ;
- Une adaptation de ces modèles pour tenir compte de l'absence d'instrumentation et / ou de systèmes de drainage car ces cas sont fréquents dans les ouvrages hydrauliques à charge permanente ;
- Une modification des règles d'agrégations SI-ALORS, car ces modèles s'attachaient à évaluer plus particulièrement le mécanisme d'érosion interne par suffusion alors que nous nous intéressons de manière plus large au mécanisme d'érosion interne. Par exemple le mécanisme d'érosion interne de conduit doit être pris en compte dans les modèles vis-à-vis de la présence de végétation arborée.

Les ouvrages hydrauliques à charge permanente soumis à la présence de végétation arborescente, et plus particulièrement les petits barrages qui ont retenus notre attention dans le cadre de l'implication de ces travaux de thèse dans le projet européen RISBA (RISques des BArrages), peuvent être de différents types. Plusieurs types sont alors envisagés :

- 
- Les barrages en remblai homogène non drainés et non équipés d'instruments d'auscultation ;
  - Les barrages en remblai homogène drainés mais non équipés d'instruments d'auscultation ou inversement ;
  - Les barrages en remblai surmontés d'un masque amont en béton mais non drainés et non équipés d'instruments d'auscultation ;
  - Les barrages en remblai surmontés d'un masque étanche en argile drainés mais non équipés d'instruments d'auscultation ;
  - Les barrages en remblai zoné (noyau étanche) avec un drainage uniquement dans le remblai et non équipés d'instruments d'auscultation ;
  - Les barrages en remblai zoné (noyau étanche) drainés et non équipés d'instruments d'auscultation.

Les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente préalablement identifiés et formalisés selon la méthodologie présentée en partie 2 chap. 2, ont été intégrés aux modèles existants au cours des séances de travail avec le groupe d'expertise.

Afin d'adapter les modèles existants d'évaluation de la performance à des ouvrages ne possédant pas d'instruments d'auscultation, des indicateurs d'état relevant des modèles de conformité aux règles de l'art développés par Curt (2008) ont été intégrés aux modèles d'évaluation de la performance ; ces indicateurs concernent la conception ou la réalisation des ouvrages. Par exemple, l'indicateur d'état « *Augmentation du débit* » (Figure 26) qui permet d'évaluer la fonction relative à l'étanchéité intrinsèque de l'ouvrage est remplacé par l'indicateur d'état « *Perméabilité* » du composant considéré (remblai ou fondation). Ce dernier est appréhendé à partir d'informations telles que la perméabilité du matériau, la granulométrie ou le compactage.

A l'instar de la construction des structures d'agrégation des indicateurs d'état développés pour les ouvrages à charge temporaire (partie 2, chap. 4, section 1), le groupe d'experts a proposé des règles de type SI...ALORS pour l'agrégation des indicateurs d'état, résumée sous la forme de tables de vérité. Ces règles d'agrégation permettent de prendre en compte de manière plus large le mécanisme de détérioration par érosion interne.

Enfin, l'adaptation aux différents cas de barrages rencontrés (différents types d'étanchéité, présence ou absence de système de drainage, présence ou absence de d'instruments d'auscultation) est réalisée au travers d'une approche modulaire. Celle-ci permet une adaptation aisée des modèles aux différents types de barrages. Plusieurs modules sont développés et en fonction du type d'ouvrage, ils sont combinés pour obtenir un modèle d'évaluation de la performance adapté.

*Enfin, nous proposons deux avancées importantes par rapport aux modèles existants :*

- *Proposer des modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge permanente vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne en tenant compte de la présence de végétation arborescente et ce pour les différents types de mécanisme d'érosion interne (érosion interne de conduit, régressive, de contact, par suffusion) ;*
- *Proposer une évaluation modulaire en fonction du type de barrage rencontré (dispositifs d'étanchéité / de drainage / présence ou absence d'auscultation) : barrage en remblai sans drains ni instruments d'auscultation, barrage en remblai avec drains mais sans instruments d'auscultation, barrage en remblai avec un masque amont étanche en béton conventionnel non drainé et non ausculté...*



---

## ***Chapitre 5. Procédure : démarche de calibration et de validation des modèles***

La calibration et la validation des modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire et permanente est une étape essentielle. Elle permet de justifier la robustesse de la méthode développée.

### ***1. Ouvrages hydrauliques à charge temporaire***

Pour les ouvrages hydrauliques à charge temporaire, la démarche de validation des formalisations et des agrégations des indicateurs d'état permettant l'évaluation de chacun des critères fonctionnels a été réalisée en plusieurs étapes.

Dans un premier temps, des simulations de l'évaluation des critères sont réalisées en séances avec le groupe d'experts. Cette étape permet de valider la cohérence des formalisations et des agrégations des indicateurs d'état pour l'évaluation des différents critères. Ce premier travail de validation est réalisé sur des cas simplifiés. Environ quatre simulations pour chaque critère fonctionnel sont produites. Les trois premières simulations font l'objet d'une notation des experts par consensus pour l'ensemble des indicateurs d'état. Cette procédure permet de valider avec les experts le modèle d'agrégation produit pour l'évaluation de chaque critère fonctionnel. Une dernière simulation fait l'objet d'une notation individuelle des experts, afin de tester la répétabilité et la reproductibilité de l'utilisation des indicateurs d'état, c'est-à-dire pour valider les formalisations réalisées pour chaque indicateur.

Dans un second temps, un dossier présentant un cas réel de digue de protection fluviale boisée a été transmis individuellement à chaque expert pour l'évaluation de la performance du composant « corps de digue » vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne. Les experts ont noté chacun des indicateurs d'état nécessaires, la performance du corps de digue a ensuite été calculée par le modèle. La performance de cet ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne avait été évaluée en 2012 dans le cadre de la thèse de Vuillet (2012). Ceci a motivé notre choix vis-à-vis de cet ouvrage car cela permet de tester l'apport de l'intégration des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente par rapport au modèle initial et la formalisation de l'ensemble des indicateurs d'état pour l'évaluation de chacun des critères. Une restitution des résultats est réalisée en séance avec le groupe d'expert.

Enfin, trois applications, sur cas réels avec déplacement sur le terrain du groupe d'experts, ainsi que des ingénieurs volontaires pour utiliser la méthode, sont réalisés afin de valider les modèles d'évaluation de la performance d'un ouvrage hydraulique à charge temporaire vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne et affouillement du fait de la présence de végétation arborescente. Les notations sont effectuées dans un premier temps de manière individuelle afin de vérifier la justesse des formalisations des indicateurs d'état puis une notation par consensus est demandée aux experts. La robustesse des formalisations est également jaugée par la participation d'ingénieurs moins expérimentés. Il est demandé aux ingénieurs experts de donner une note aux critères fonctionnels sans utilisation des indicateurs d'état formalisés. Cette étape permettra de vérifier que la performance de chaque critère fonctionnel calculée avec le modèle est cohérente avec l'avis des experts.

De manière générale, trois documents sont fournis aux experts afin qu'ils réalisent l'évaluation des indicateurs d'état :

- Une description des ouvrages ;
- Un dossier comprenant les indicateurs d'état formalisés ;
- Une fiche de notation des indicateurs d'état.

Le Tableau 9 présente un extrait de cette fiche. Les différents indicateurs d'état IE1.i sont notés de 0 à 10 en fonction des références établies pour chaque indicateur et ce, pour chaque tronçon de digue à évaluer (T1, T2, ..., Tn). Les experts donnent également une note « à dire d'experts » au critère fonctionnel sans utilisation du modèle.

**Tableau 9. Extrait de la fiche de notation utilisée pour l'évaluation de la performance d'une digue de protection fluviale vis-à-vis du mécanisme de détérioration C1, EI (Ti = tronçon homogène, Ci, EI = critère fonctionnel relatif à l'érosion interne, IE = indicateur d'état)**

Critères	Indicateurs d'état	Note			Evaluation des critères fonctionnels à dire d'experts		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3
C1, EI « Perméabilité du corps de digue »	IE1.1 « Fuites, indices de fuites »						
	IE1.2 « Perméabilité du matériau »						
	IE1.3 « Géométrie de la digue »						
	IE1.4 « Densité des individus »						
	IE1.5 « Volume racinaire par individu »						
	IE1.6 « Type de structure racinaire par individu »						
	IE1.7 « Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu »						

La notation de l'indicateur IE1.1 « *Fuites, indices de fuites* » est délicate en dehors des crues. En effet, les digues de protection contre les inondations sont rarement en charge, il est donc plus difficile de détecter des fuites. Les évaluateurs noteront alors « NR » (Non renseigné) sur la fiche.

## 2. Ouvrages hydrauliques à charge permanente

Pour les ouvrages hydrauliques boisés à charge permanente, les applications sont réalisées sur des ouvrages sélectionnés dans le cadre du projet RISBA.

Au total 7 applications ont été réalisées permettant de vérifier la concordance des formalisations et agrégations des indicateurs d'état et également des agrégations des performances des fonctions pour l'obtention de la performance d'un composant (remblai, interface remblai-fondation, fondation) vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne.

Pour chaque ouvrage deux ingénieurs avec des niveaux d'expérience différents se sont rendus sur le terrain afin de noter l'ensemble des indicateurs nécessaires pour l'évaluation de la performance de chacun des ouvrages vis-à-vis de l'érosion interne. Un dossier récapitulatif chaque indicateur d'état et sa grille de formalisation leur a été fourni. Un type de fiche de notation similaire à celle présentée sur le Tableau 9 est fourni à l'utilisateur. La notation a été réalisée par les ingénieurs d'abord de manière indépendante, puis des notes consensuelles ont été dégagées par discussions entre ces ingénieurs. La performance des fonctions puis la performance vis-à-vis de l'érosion interne de chaque composant ont été calculées en utilisant le modèle, et en parallèle les experts ont déclaré une note globale sans utilisation du modèle.

Une restitution des résultats a ensuite été réalisée avec le groupe d'experts afin d'apporter les derniers ajustements aux modèles d'évaluation de la performance.

### **3. Validation : traitements des résultats obtenus**

La validation des formalisations des différents indicateurs d'état est obtenue grâce à la notation individuelle des évaluateurs. Un indicateur est considéré comme correctement formalisé si :

- chaque évaluateur a pu noter aisément l'indicateur. Ce qui signifie que la définition et les caractéristiques de ce dernier sont facilement compréhensibles ;
- les écarts de note, pour un indicateur sur un ouvrage donné, sont faibles (pas plus de deux points de différences sur l'échelle quantitative allant de 0 à 10 (Figure 29)).

Les agrégations des indicateurs calculées par le modèle sont considérées validées si les résultats intermédiaires (évaluation des critères ou des fonctions) et le résultat de performance de l'ouvrage est cohérent avec l'avis des experts, soit avec la note qu'ils auraient donnée sans utilisation du modèle. Nous considérons qu'un écart d'un point sur l'échelle quantitative (avec ou sans changement de catégorie qualitative) est tolérable.

Ces agrégations sont également validées si le résultat d'évaluation des critères, obtenus suite aux notations individuelles des indicateurs par les évaluateurs, ne dépasse un écart de un point sur l'échelle qualitative (avec ou sans changement de catégorie qualitative).

Nous observons également à travers les résultats obtenus lors des applications, l'influence de la prise en compte de la végétation arborescente sur la note de performance de l'ouvrage. Ainsi, les modèles sont employés avec et sans prise en compte de la végétation. Si un écart d'au moins un point sur l'échelle d'évaluation avec un changement de catégorie qualitative en résulte (par exemple passage d'une catégorie médiocre à mauvaise), nous pouvons estimer que la prise en compte de la végétation améliore la sensibilité des modèles.

## Chapitre 6. Synthèse générale

Notre démarche méthodologique répond aux deux questions scientifiques posées dans cette thèse. La question principale étant de développer des modèles pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente. La sous-question scientifique rattachée à cette question principale étant de développer des mesures indirectes permettant d'appréhender l'état de décomposition des racines ligneuses à la suite d'un abattage ou de la mort naturelle d'un arbre. Le schéma synthétique ci-dessous illustre de manière détaillée la méthodologie que nous avons suivie pour répondre à ces questions (Figure 42).

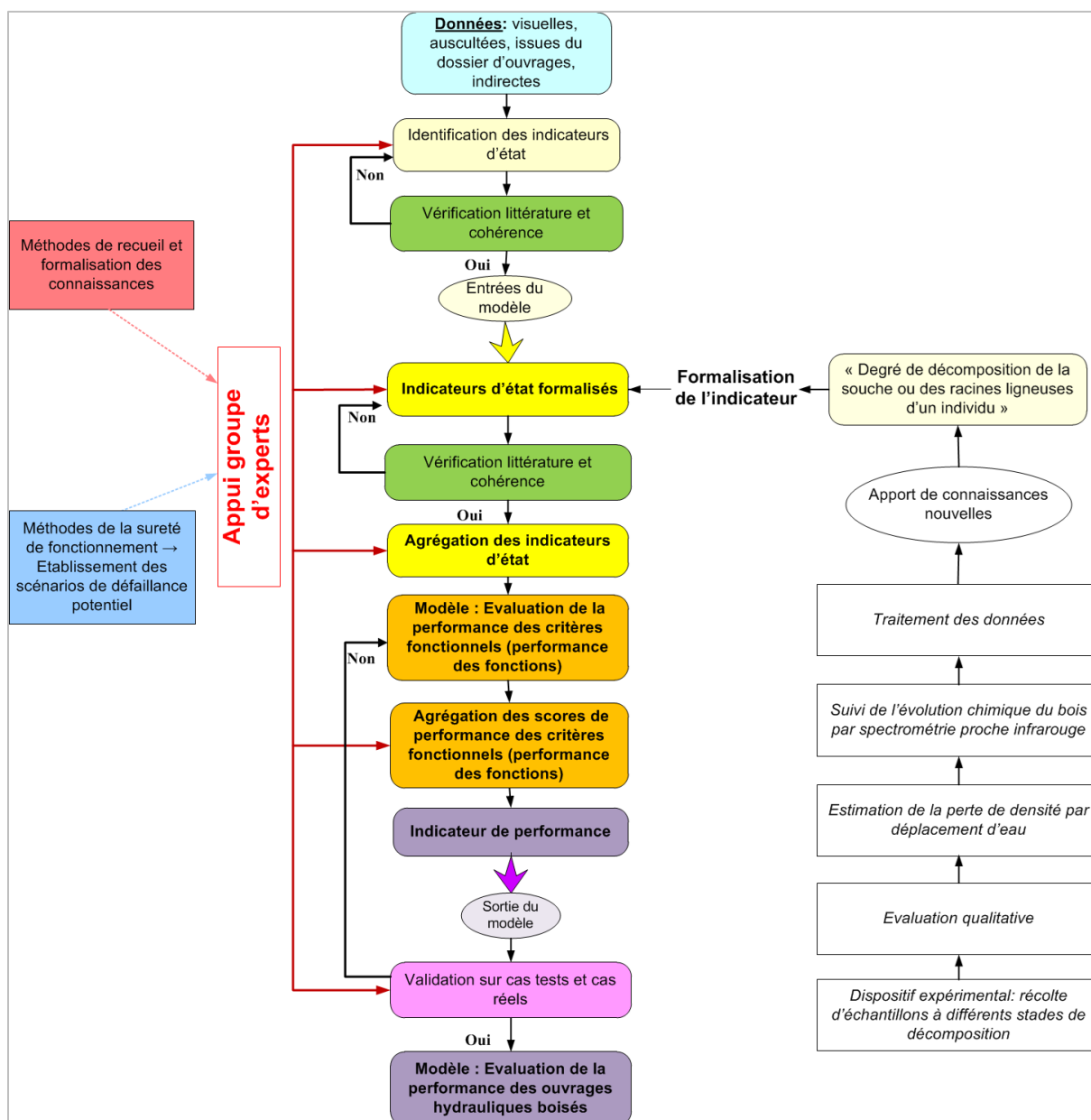


Figure 42. Méthodologie proposé dans la thèse pour répondre à la question scientifique principale et à la sous question scientifique posés dans cette thèse



# Partie 3

# Résultats

*Chapitre 1. Développement de mesures indirectes*

*Chapitre 2. Identification et formalisation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente*

*Chapitre 3. Evaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne et affouillement du fait de la présence de végétation arborescente*

*Chapitre 4. Evaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge permanente vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne du fait de la présence de végétation arborescente*

*Chapitre 5. Synthèse*



Cette partie présente les résultats obtenus au cours de la thèse. Les apports méthodologiques que nous avons réalisés et qui sont décrits ci-dessous portent sur :

- Le développement de mesures indirectes afin d'estimer l'état de décomposition des racines ligneuses ;
- L'identification et la formalisation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente ;
- Les modélisations développées pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne et affouillement du fait de la présence de végétation arborescente ;
- Les modélisations développées pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge permanente vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne du fait de la présence de végétation arborescente.

## ***Chapitre 1. Développement de mesures indirectes de la décomposition des racines***

L'estimation de l'état de décomposition des racines ligneuses est une information essentielle afin de prévoir les conséquences potentielles sur l'initiation ou l'aggravation d'un mécanisme de détérioration par érosion interne de conduit. Afin d'appréhender cette information, nous avons utilisé/développé des mesures indirectes. *Ces développements visent à établir la faisabilité de ces mesures et à fournir des tendances d'évolution de la décomposition des racines pour différentes espèces végétales.*

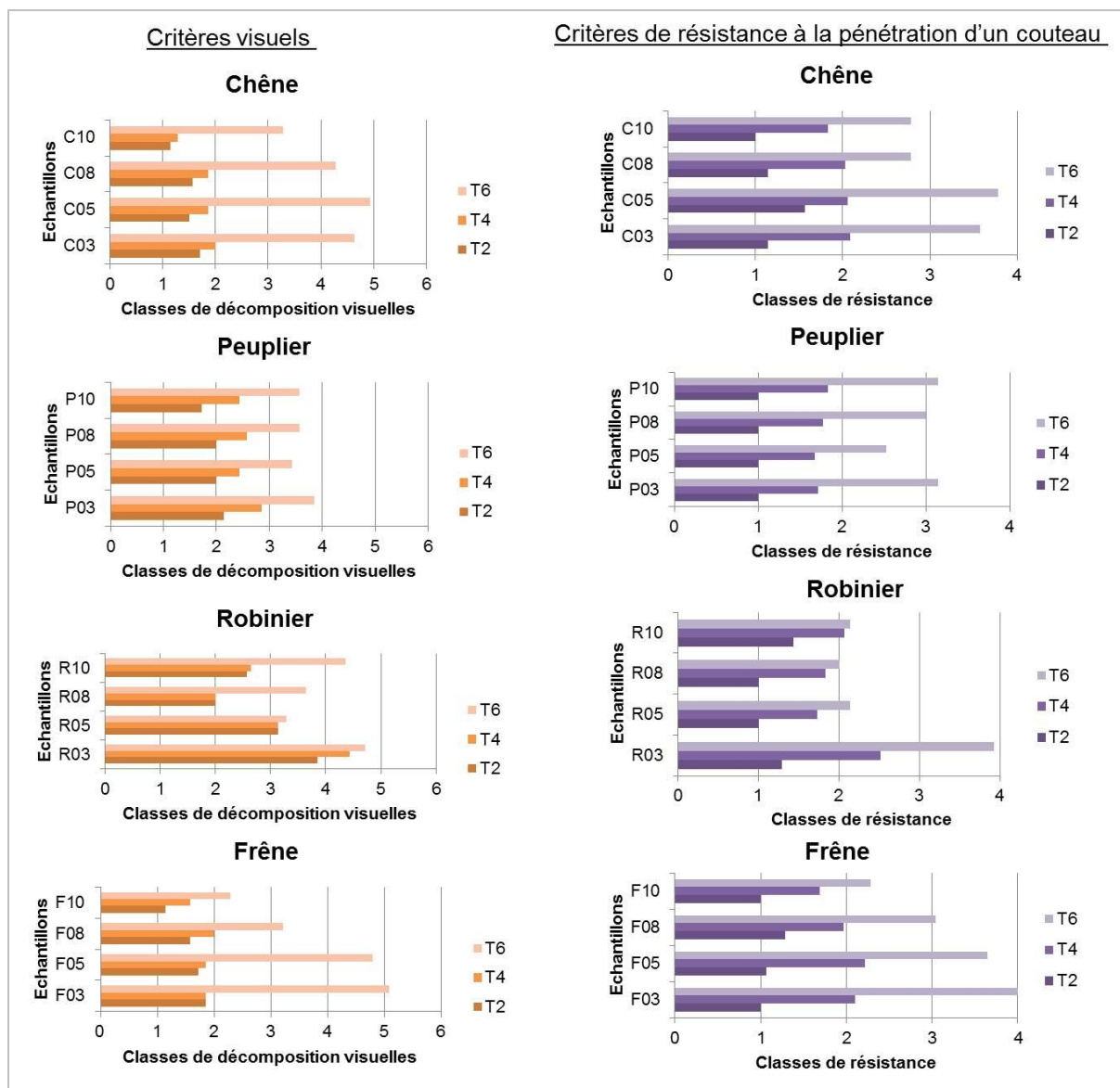
Deux dispositifs expérimentaux (Isère et Castérino) ont été mis en place. **Nous présentons dans ce mémoire l'ensemble des résultats obtenus sur les échantillons issus du premier dispositif.** Une synthèse des résultats du dispositif de Castérino sont disponibles en ANNEXE 2. Dans un premier temps, les résultats des évaluations qualitatives réalisées tous les deux ans sur les échantillons du dispositif de l'Isère sont présentés. Nous illustrons ensuite les résultats obtenus à l'aide des évaluations quantitatives : l'évaluation de la perte de densité sèche et l'évolution de la composition chimique globale des échantillons au cours de leur décomposition.

### ***1. Evaluation qualitative***

Afin d'évaluer qualitativement lors des déterrages (environ tous les deux ans), l'ensemble des échantillons de racines de différentes espèces et de différents diamètres, mis en place au sein des dispositifs expérimentaux, nous avons choisi d'utiliser deux méthodes (partie 2, chap. 3, section 2) : l'évaluation qualitative du bois par (i) des critères visuels et tactiles et (ii) par test de résistance à la pénétration de la lame d'un couteau.

A T2 (respectivement T4, T6), 144 (respectivement 128, 112) échantillons sont évalués qualitativement à l'aide des deux méthodes choisies. Les résultats illustrés sur la Figure 43 représentent pour chaque diamètre une moyenne de 9 échantillons pour T2, 8 échantillons pour T4 et 7 échantillons pour T6.





**Figure 43. Résultats de l'évaluation qualitative de la décomposition des échantillons de racines issus du dispositif expérimental de l'Isère (Echelle visuelle de 0 à 6 - Echelle de résistance de 0 à 4 ; C = Chêne, P = Peuplier, R = Robinier, F = Frêne).**

Globalement, pour l'ensemble des échantillons et d'un stade de décomposition à l'autre, nous observons un changement de classe de dégradation aussi bien sur critères visuels que de résistance à la pénétration. Comme par exemple, pour le peuplier (Figure 43), où les échantillons relevant de chaque diamètre passent d'une classe de dégradation visuelle de 2 à 3 entre T2 et T4 et de 3 à 4 entre T4 et T6. De même, les échantillons de peuplier passent d'une classe de résistance à la pénétration au couteau de 1 à 2 entre T2 et T4 et de 2 à 3, voire de 4 entre T4 et T6.

Un test de Kruskal-Wallis a été effectué afin de vérifier les différences significatives qui existent entre les différents stades de décomposition pour un groupe d'échantillons donné et ce, pour les deux types d'analyses qualitatives réalisées. Ce test a été effectué pour chaque groupe d'échantillons de même diamètre et de même espèce. Le Tableau 10 illustre les résultats du test effectué pour le chêne de diamètre 3.

**Tableau 10. Test de Kruskal-Wallis sur les échantillons de chêne de diamètre 03 aux trois stades de décomposition T2, T4 et T6 (Sig. = Significatif)**

	Taille de l'échantillon	Rang moyen
T2	9	8,33333
T4	8	10,125
T6	7	20,5714

Test statistique = 14,6729 Probabilité = 0,000651351

Intervalle de Bonferroni à 95,0%

Contraste	Sig.	Différence	+/- limites
T2 - T4		-1,79167	8,22554
T2 - T6	*	-12,2381	8,53092
T4 - T6	*	-10,4464	8,76109

\* indique une différence statistiquement significative.

Dans cet exemple, le test montre des différences significatives lors de la comparaison des échantillons appartenant aux stades de décomposition T2 et T6, et également entre ceux issus de T4 et T6. La différence n'est pas significative entre les échantillons issus de T2 et T4.

Le Tableau 11 synthétise les comparaisons par paires (T2-T4 ; T2-T6 ; T4-T6) obtenues à partir du test de Kruskal-Wallis pour l'analyse qualitative à partir de critères visuels. Les lettres A, B et C représentent respectivement les stades de décomposition T2, T4 et T6. Lorsqu'il y a une différence significative de critères visuels entre deux stades les lettres ne sont pas associées.

**Tableau 11. Synthèse des comparaisons par paires entre les rangs moyens des trois stades de décomposition T2, T4 et T6 (Intervalle de Bonferroni à 95,0 % \_ test de Kruskal-Wallis) pour l'analyse qualitative visuelle (A- représente T2, B – représente T4 et C- représente T6).**

	Diamètre 03			Diamètre 05			Diamètre 08			Diamètre 10		
	T2 (A)	T4 (B)	T6 (C)	T2 (A)	T4 (B)	T6 (C)	T2 (A)	T4 (B)	T6 (C)	T2 (A)	T4 (B)	T6 (C)
Chêne	AB	BA	C	AB	BA	C	AB	BA	C	AB	BA	C
Frêne	AB	BA	C	AB	BA	C	ABC	BAC	CAB	ABC	BAC	CAB
Robinier	ABC	BAC	CAB	ABC	BAC	CAB	AB	BA	C	AB	BA	C
Peuplier	AB	BAC	CB	AB	BAC	CB	AB	BAC	CB	AB	BAC	CB

Les observations que nous tirons de ces résultats sont :

- pour l'ensemble des diamètres, le chêne ne présente pas de modifications importantes entre T2 et T4. En effet, il n'y a aucune différence significative entre T2 et T4 ;
- pour les petits diamètres (03 et 05), le frêne présente des modifications visuelles importantes entre T4 et T6. Pour les diamètres 08 et 10, les modifications visuelles ne sont pas significatives ;
- pour les petits diamètres (03 et 05), le robinier ne présente pas de différences significatives entre les trois stades de décomposition. Pour les plus gros diamètres (08 et 10), nous notons une modification entre les stades T4 et T6.
- pour les échantillons de peuplier, la différence se note entre les stades T2 et T6. Les échantillons à T4 ne sont pas significativement différents ni de T2, ni de T6.

Le Tableau 12 synthétise les comparaisons par paires (T2-T4 ; T2-T6 ; T4-T6) obtenues à partir du test de Kruskal-Wallis pour l'analyse qualitative de résistance à la pénétration d'une lame de couteau.

**Tableau 12. Synthèse des comparaisons par paires entre les rangs moyens des trois stades de décomposition T2, T4 et T6 (Intervalles de Bonferroni à 95, 0 % \_ test de Kruskal-Wallis) pour l'analyse qualitative de résistance à la pénétration d'un couteau**

	Diamètre 03			Diamètre 05			Diamètre 08			Diamètre 10		
	T2 (A)	T4 (B)	T6 (C)	T2 (A)	T4 (B)	T6 (C)	T2 (A)	T4 (B)	T6 (C)	T2 (A)	T4 (B)	T6 (C)
<b>Chêne</b>	AB	BAC	CB	AB	BA	C	A	BC	CB	A	BC	CB
<b>Frêne</b>	AB	BAC	CB	A	BC	CB	AB	BAC	CB	A	BC	CB
<b>Robinier</b>	AB	BAC	CB	A	BC	CB	A	BC	CB	ABC	BAC	CAB
<b>Peuplier</b>	AB	BAC	CB	AB	BAC	CB	AB	BAC	CB	AB	BAC	CB

Les observations que nous tirons de ces résultats sont :

- pour le chêne, les échantillons de diamètre 03 présentent une différence significative de résistance à la pénétration du couteau entre T2 et T6. Les échantillons de chêne à T4 ne sont pas significativement différents ni de T2, ni de T6. Les échantillons de diamètre 05 présentent une modification de résistance significative à partir de T4. Pour les plus gros diamètres (08 et 10), nous notons des différences entre T2 et T4 mais pas entre T4 et T6 ;
- pour le frêne, les échantillons de diamètre 03 et 08 présentent une différence significative entre les stades T2 et T6. Les diamètres 05 et 10 ne montrent pas de modifications importantes entre T4 et T6 mais entre T2 - T4 et T2 - T6;
- pour le robinier, les échantillons de diamètre 03 la différence de résistance à la pénétration n'est significative qu'entre les stades de décomposition T2 et T6. Pour les échantillons de diamètre 05 et 08, nous notons qu'il n'y a pas de différences significatives entre les stades T4 et T6. Enfin pour le plus gros diamètre (10), aucune différence significative n'est relevée entre les trois stades de décomposition ;
- pour l'ensemble des diamètres des échantillons de peuplier, nous notons une différence significative entre les stades de décomposition T2 et T6. Les échantillons appartenant à la catégorie T4 ne présente pas de modifications importantes lors de leur comparaison à T2 et à T6.

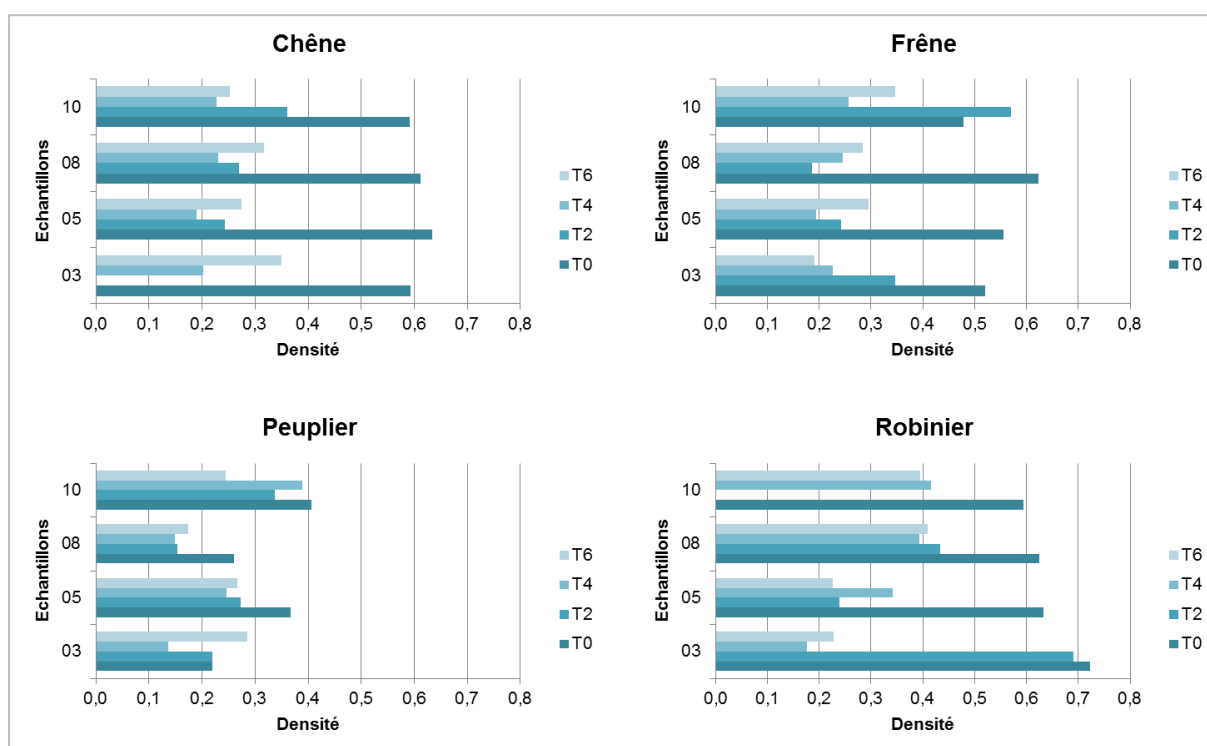
Afin d'obtenir une tendance générale pour chaque espèce nous effectuons un test de Kruskal-Wallis pour chaque espèce avec tous les diamètres confondus. Pour les données obtenues avec l'analyse qualitative visuelle, les échantillons de chêne, frêne et robinier présentent des différences significatives entre les stades de décomposition T2 - T6 et T4 - T6. La différence entre les stades de décomposition T2 et T4 n'est pas significative. Ce résultat peut signifier que l'évolution de la décomposition des échantillons de racines est peu marquée pendant quatre ans. Par contre entre la quatrième et la sixième année de décomposition, les échantillons ont subi des modifications de leurs caractéristiques visuelles plus importantes. Pour le peuplier, les différences sont significatives lors des comparaisons entre les trois stades de décomposition. Ainsi, les modifications visuelles des échantillons sont notables après chaque analyse. Le test effectué sur les données de l'analyse qualitative de résistance à la pénétration d'une lame de couteau montre que pour le chêne, le frêne et le peuplier chaque stade de décomposition (T2, T4 et T6) est significativement différent. Pour les échantillons de robinier, les stades T4 et T6 ne sont pas significativement différents vis-à-vis de ce critère.

## 2. Evaluation quantitative

L'évaluation quantitative de la décomposition des échantillons de racines ligneuses est réalisée à l'aide de deux méthodes (partie 2, chap. 3, section 3) : l'évaluation de la perte de densité sèche par déplacement d'eau et l'évaluation de l'évolution de la composition chimique par spectrométrie proche infrarouge (SPIR). Nous présentons ci-dessous les résultats obtenus à l'aide de ces deux méthodes.

## 2.1. Perte de densité sèche des échantillons de racines ligneuses au cours de leur décomposition

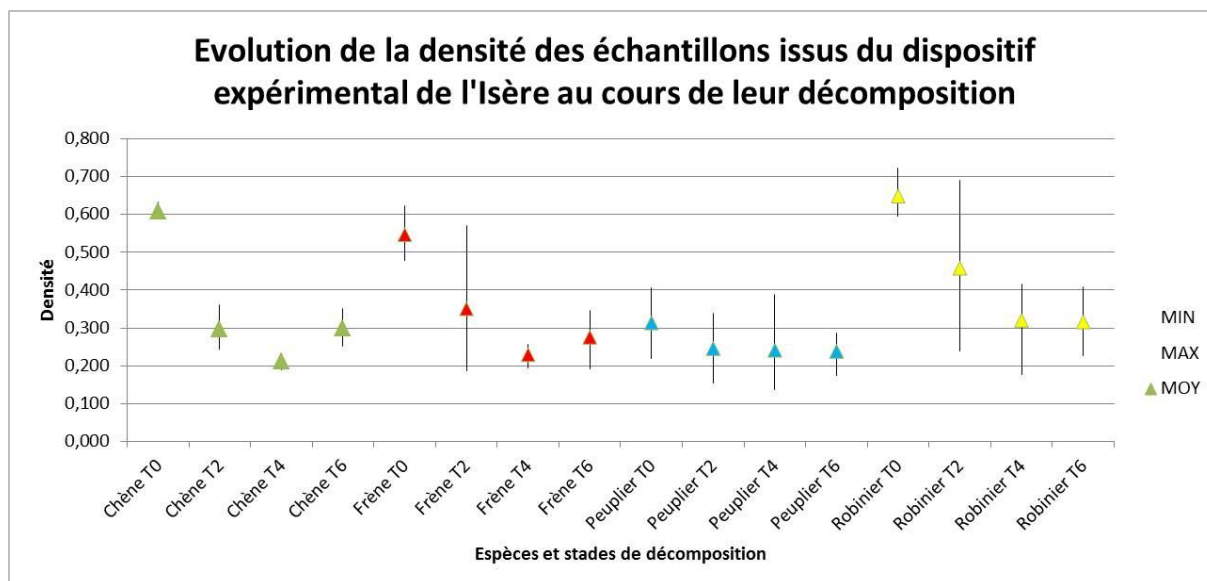
Les résultats présentés sur la Figure 44 illustrent l'évolution de la perte de densité sèche des échantillons du dispositif expérimental de l'Isère en fonction de leur diamètre et leur espèce. Chaque barre horizontale présentée sur les graphes représente la moyenne obtenue après trois répétitions de la mesure pour chaque échantillon. Nous avons testé la répétabilité de la méthode d'évaluation de la densité sèche des échantillons de racine par déplacement d'eau. Après trois répétitions de la mesure de densité, nous avons calculé la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation. Les faibles écarts types (entre 0,001 et 0,002) ainsi que les faibles coefficients de variations (entre 0,001 et 0,004) obtenus montrent que la méthode est fiable au vu de sa reproductibilité pour chaque échantillon. Nous donnons en ANNEXE 3 le tableau résumant ces paramètres pour la série d'échantillons de racine de chêne à T0. Un seul échantillon est disponible par diamètre et par espèce : les interprétations ci-dessous constituent des tendances et devront être complétées.



**Figure 44. Evolution de la densité en fonction du stade de décomposition et des diamètres pour chaque espèce issue du dispositif expérimental de l'Isère**

Globalement, la densité tend à diminuer pour un même diamètre entre T0 et T6. Nous avons effectué un test de Kruskal-Wallis pour chaque espèce tous diamètres confondus afin d'avoir un total de 4 échantillons par espèce voire 3 si la mesure n'a pas pu être effectuée. Parmi les quatre espèces étudiées, seul le chêne présente une différence significative entre T0 et T4.

La Figure 45 illustre l'évolution de la densité des échantillons de chêne, frêne, peuplier et robinier au cours des six années de décomposition. Nous représentons sur ce graphique l'évolution de la perte de densité en fonction des essences, tous diamètres confondus, ce qui nous permet d'obtenir sur un nombre plus important d'échantillons (n=4 par espèce et par temps de décomposition). Sont représentés pour chaque cas, la moyenne, le minimum et le maximum.



**Figure 45.** Graphique représentant l'évolution de la densité en fonction des espèces et des stades de décomposition des échantillons issus du dispositif expérimental de l'Isère

Sur la Figure 45 nous observons que pour toutes les espèces, la plus forte perte de densité se situe entre T0 et T2. Le chêne, le frêne et le robinier ont une perte de densité qui se poursuit entre T2 et T4, contrairement au peuplier. Une stabilisation de la densité est observée entre T4 et T6. Toutefois, ces interprétations doivent être considérées avec prudence compte tenu de la variabilité introduite par notre procédé d'échantillonnage et déjà signalée ci-avant.

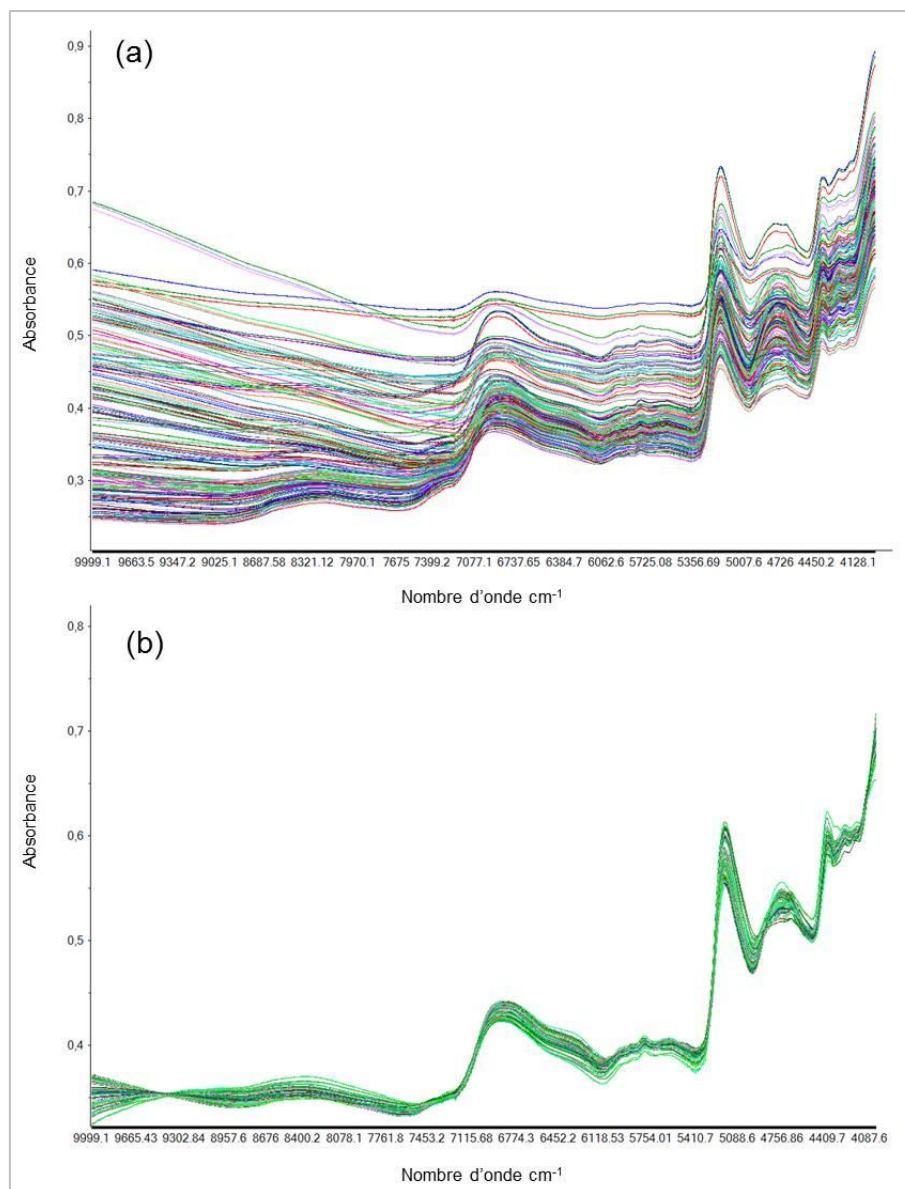
## 2.2. Evaluation de l'évolution chimique des échantillons de racines ligneuses au cours de leur décomposition

Nous avons suivi l'évolution chimique des échantillons de racines ligneuses au cours de leur décomposition à l'aide de la Spectrométrie Proche InfraRouge (SPIR). Les données spectrales obtenues sont traitées à l'aide d'outils chimiométriques (partie 2, chap.3, section 3.2.3). Nous présentons ci-dessous les résultats obtenus.

### 2.2.1. Prétraitement des spectres

Les données spectrales obtenues en SPIR, sont préalablement prétraitées à l'aide d'une EMSC (Extended Multiplicative Scatter Correction) afin de compenser les effets additifs et multiplicatifs de ces données. Ce prétraitement réalisé en amont des analyses faites, nous permet de ne travailler que sur l'information utile de la matrice de données spectrales que nous avons constituée. Pour le développement des modèles de régressions des moindres carrés partiels (PLS), une EMSC est réalisée pour les échantillons destinés à la calibration des modèles et une autre EMSC est réalisée pour les échantillons destinés à la prédiction.

La Figure 46 illustre les spectres PIR des échantillons de poudre tamisé (< 315 $\mu$ m) avant (Figure 46 - a) et après (Figure 46 - b) un prétraitement EMSC.

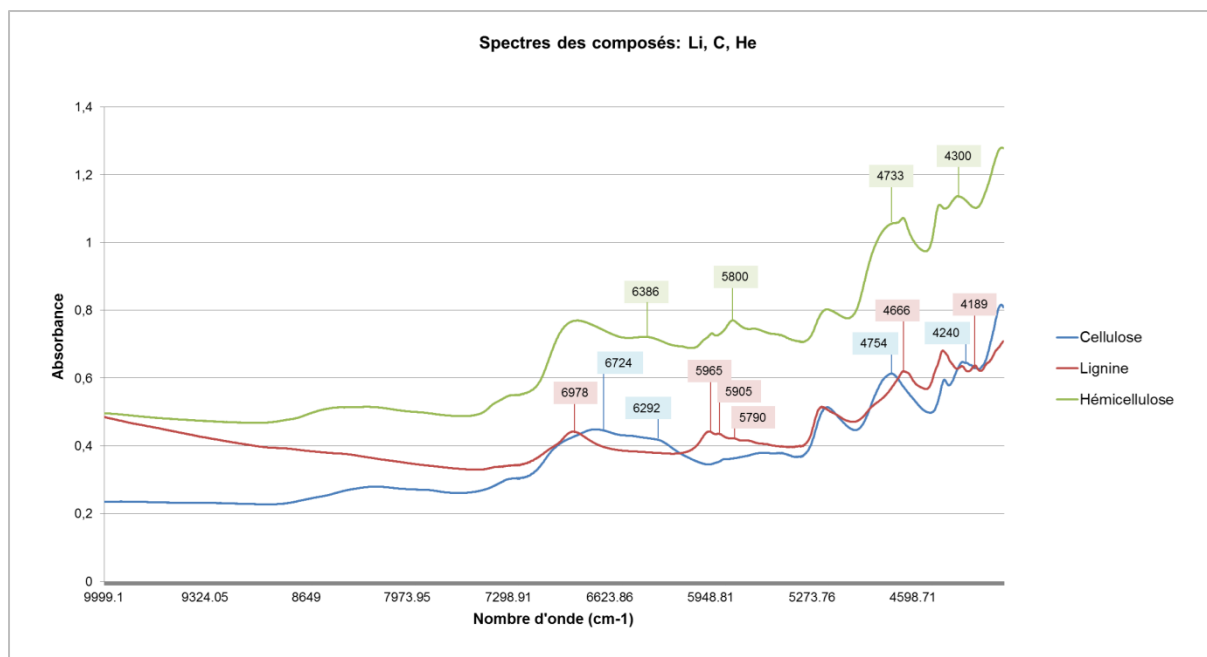


**Figure 46. Spectres de l'ensemble des échantillons avant (a) et après prétraitement EMSC (b) (n=192)**

### 2.2.2. Analyse exploratoire

Afin d'effectuer une analyse exploratoire des données et de comprendre l'évolution moléculaire que subissent les échantillons au cours de la dégradation, dans un premier temps les spectres des trois constituants majeurs du bois (cellulose, l'hémicellulose ou la lignine) ont été acquis. La Figure 47 illustre les spectres acquis pour chaque composé et les bandes caractéristiques sélectionnées. Les bandes spectrales ayant des pics aux nombres d'ondes 6724, 6292, 4754 et 4240 cm<sup>-1</sup> correspondent à la cellulose. Les bandes spectrales avec des pics à 6978, 5965, 5905, 5790, 5210, 4666 et 4189 cm<sup>-1</sup> sont attribuées à la lignine et les bandes spectrales avec des pics à 6386, 5800, 4733 et 4300 cm<sup>-1</sup> sont attribuées à l'hémicellulose.





**Figure 47. Spectres de lignine, cellulose et hémicellulose. Identification de quelques bandes caractéristiques à chaque composé**

Ensuite plusieurs analyses exploratoires utilisant la méthode d'analyse en composantes principales (ACP) sont effectuées. Une première ACP est réalisée sur l'ensemble des échantillons de racines issus du dispositif expérimental de l'Isère aux quatre temps de décomposition étudiés (T0, T2, T4 et T6). Celle-ci permet d'étudier l'évolution moléculaire des échantillons en fonction du temps de décomposition mais également de vérifier si les différences moléculaires corrélées à la décomposition sont quantitativement plus importantes que les différences moléculaires entre les différentes essences de bois. L'étude des « loadings<sup>5</sup> » de l'ACP permet de mettre en évidence les variables importantes dans la construction des composantes principales et donc pour la séparation des groupes d'échantillon.

L'identification au sein des « loadings », des bandes spectrales caractéristiques des constituants majeurs du bois (cellulose, l'hémicellulose ou la lignine) permet de comprendre quels constituants du bois se dégradent au cours de la décomposition.

Ensuite, nous réalisons plusieurs ACP, une pour chaque temps de décomposition afin de mettre en évidence les différences de composition moléculaire entre les différentes essences et diamètres.

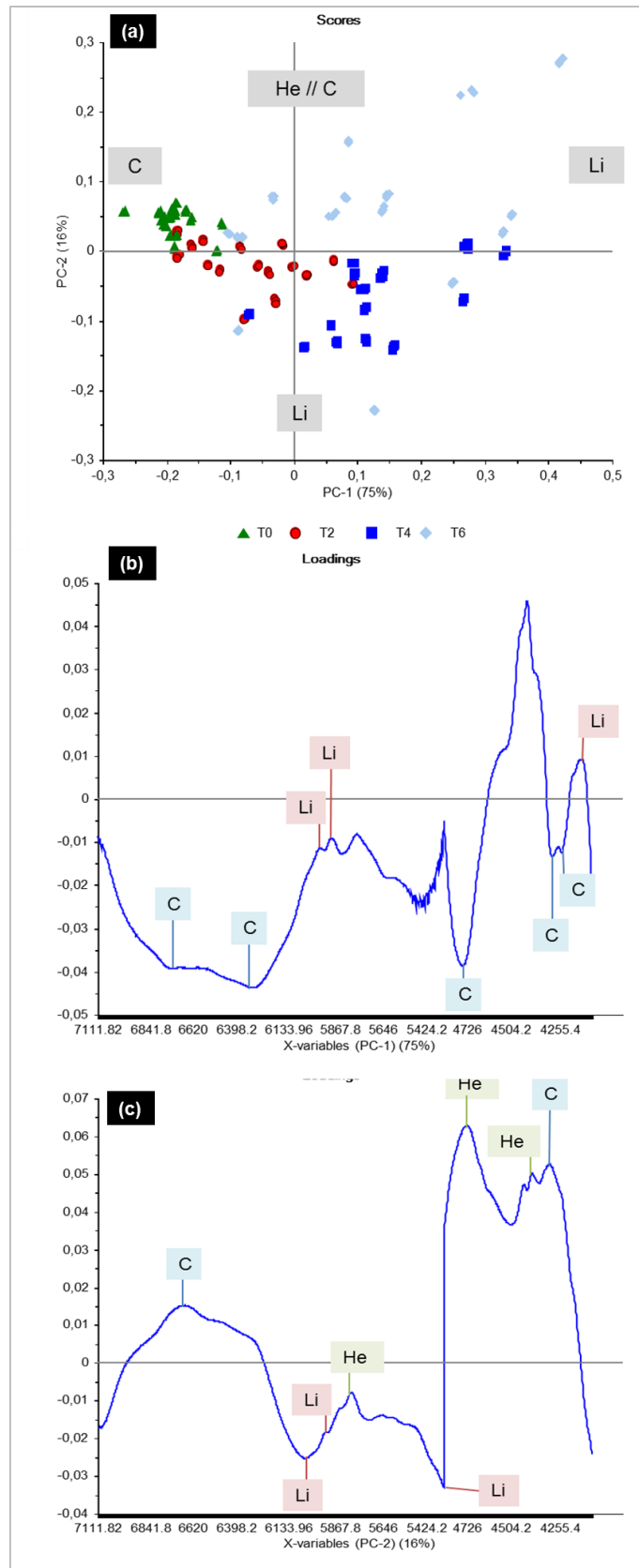
### 2.2.2.1. Analyse exploratoire sur l'ensemble des échantillons

Dans le plan 1/2 de l'ACP réalisée sur l'ensemble des 192 échantillons, le **temps de décomposition** apparaît comme le premier facteur discriminant (Figure 48). En effet, nous distinguons quatre groupes correspondant aux différents stades de décomposition où ont été récoltés les échantillons : T0, T2, T4 et T6 (Figure 48 a).

La composante principale 1 (PC1), qui représente 75 % de la variance, discrimine clairement les échantillons correspondant aux stades de décomposition T0/T2 et T4/T6. Par contre, les stades de décomposition T4 et T6 sont discriminés par la composante principale 2 (PC2) qui représente 16 % de la variance.

Les « loadings » correspondants aux PC1 et PC2 sont donnés respectivement sur les Figure 48 (b) et Figure 48 (c).

<sup>5</sup> Importance de chaque variable dans la construction des composantes.



**Figure 48.** Plan ½ de l'ACP de l'ensemble des échantillons du dispositif de l'Isère (n=192 ; variance expliquée = 91%) et visualisation de l'évolution des composés en lien avec les « loadings» \_ (composés : C = cellulose ; He = Hémicellulose ; Li = Lignine)

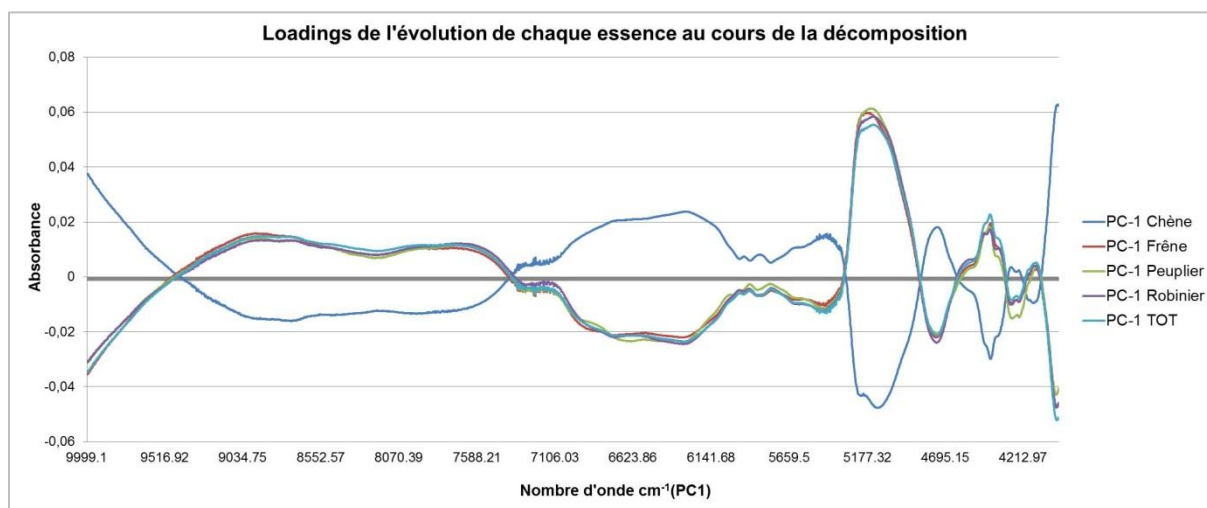


Le « loading » de la PC1 (Figure 48 b) nous permet d'attribuer une contribution négative aux bandes spectrales caractéristiques de la cellulose : 6724, 6292, 4754, 4290 et 4240  $\text{cm}^{-1}$ . Ces bandes caractérisent les échantillons de racines aux stades T0 et T2. Les bandes spectrales correspondant à la lignine (5965, 5905 et 4189  $\text{cm}^{-1}$ ) ont quant à elles une contribution positive sur cette composante. Elles caractérisent les échantillons de racines aux stades T4 et T6. A ce stade, l'évolution de la composition chimique du bois des racines au cours de leur décomposition tend principalement vers une modification de la teneur en cellulose.

Le « loading » de la PC2 (Figure 48 c) nous permet d'attribuer une contribution négative aux deux bandes spectrales majeures (5965 et 4840  $\text{cm}^{-1}$ ) qui correspondent à la lignine. Ces bandes caractérisent les échantillons de racines correspondant aux stades de décomposition T2 et T4. La contribution positive de la PC2 est principalement marquée par les bandes correspondant à l'hémicellulose et à la cellulose. Elles correspondent aux stades de décomposition T0 et T6.

*Nous résumons les interprétations comme suit : le stade T0 est marqué par une teneur importante en cellulose et hémicellulose. Le stade T2 tend à perdre de la cellulose. Le stade T4 est marqué par une teneur en lignine plus importante, ce qui s'explique par la perte de cellulose et d'hémicellulose. Enfin, le stade T6 est marqué par une stabilisation des proportions de lignine, cellulose, hémicellulose des échantillons.*

Nous avons ensuite réalisé pour chaque espèce une ACP sur l'ensemble des temps de décomposition (soit  $n=48$ ) afin de vérifier si les racines se décomposent de la même façon et en suivant la même évolution en terme de composition en lignine, cellulose et hémicellulose. Pour cela, nous comparons les « loadings » de la PC1 de chaque ACP ainsi que le « loading » de la PC1 – TOT correspondant à l'ACP de l'ensemble des échantillons ( $n=192$ ) présenté sur la Figure 48. La variance expliquée de chaque PC1 étant supérieure à 75%, nous choisissons de réaliser cette vérification uniquement sur la PC1. De plus, comme nous l'avons présenté sur la Figure 48, c'est principalement avec la PC1 que nous pouvons expliquer l'évolution de la composition chimique des échantillons de racine au cours de leur décomposition. La Figure 49 illustre ces différents « loadings ».



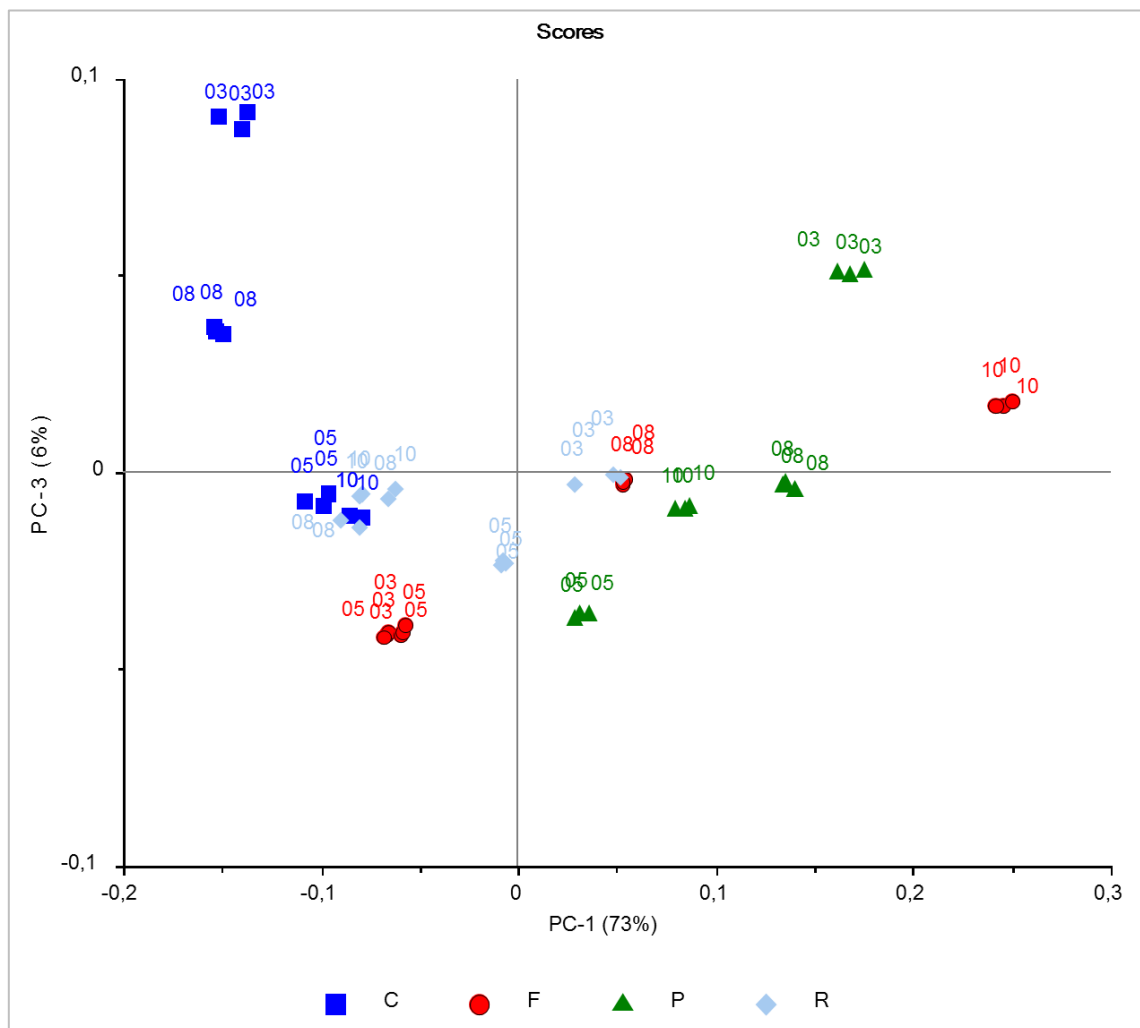
**Figure 49.** « Loadings » de la PC1 issus des ACP effectués pour chaque essence de bois ( $n = 48$ ) au cours de leur décomposition et loading de la PC1 de l'ensemble des échantillons ( $n=192$ )

Nous remarquons que l'ensemble des PC1 correspondant aux ACP réalisées pour chaque espèce et la PC1- TOT (en miroir des autres PC1) sont similaires. Bien que quelques variations entre les composantes principales permettent de déceler une influence des espèces (ou des diamètres), on remarque que l'ensemble des espèces étudiées se décompose selon un même schéma, avec une diminution de la teneur en cellulose et en hémicellulose conduisant à une augmentation en teneur relative de la lignine.

### 2.2.2.2. Analyse exploratoire sur chaque temps de décomposition

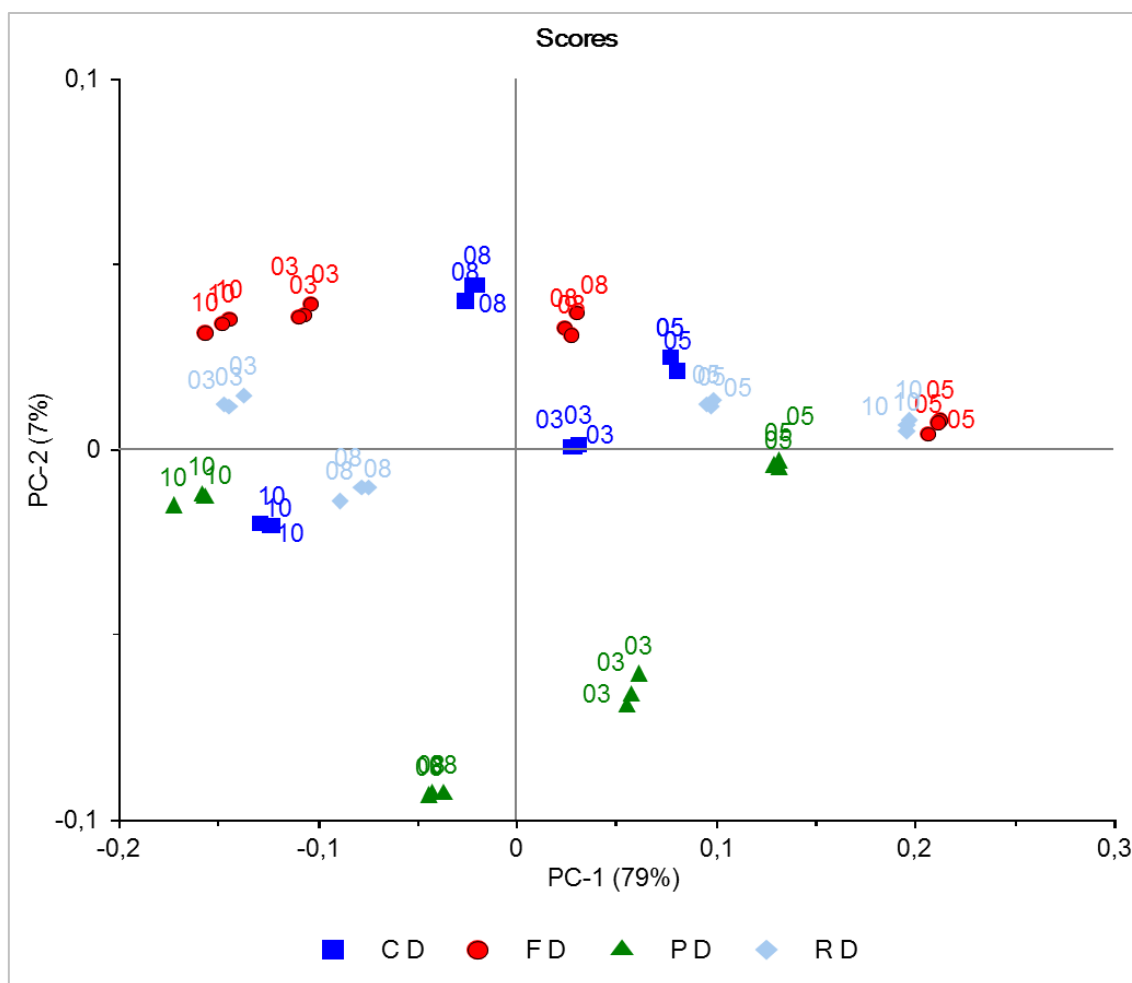
Nous réalisons une ACP pour chaque stade de décomposition (n = 48) afin de mettre en évidence des groupes correspondant aux espèces (chêne, frêne, peuplier, robinier) et des sous-groupes correspondant aux différents diamètres (03, 05, 08 et 10).

La Figure 50 montre l'ACP réalisée pour le stade de décomposition T0. Les composantes principales 1 et 3 représentent respectivement 73 % et 6 % de la variance expliquée. Nous observons à T0 quatre groupes distincts correspondant aux quatre essences étudiées. De même, des regroupements d'échantillons s'observent en fonction des différents diamètres. Le diamètre est également un facteur discriminant des échantillons que nous analysons. Selon l'espèce, des petits groupes correspondant aux diamètres se détachent du groupe principal comme par exemple pour le frêne où l'on observe un détachement du diamètre 10. Nous avons choisi d'utiliser le plan 1/3 de l'ACP car la composante principale 2 ne servait qu'à modéliser le diamètre 03 du robinier faux-acacia.

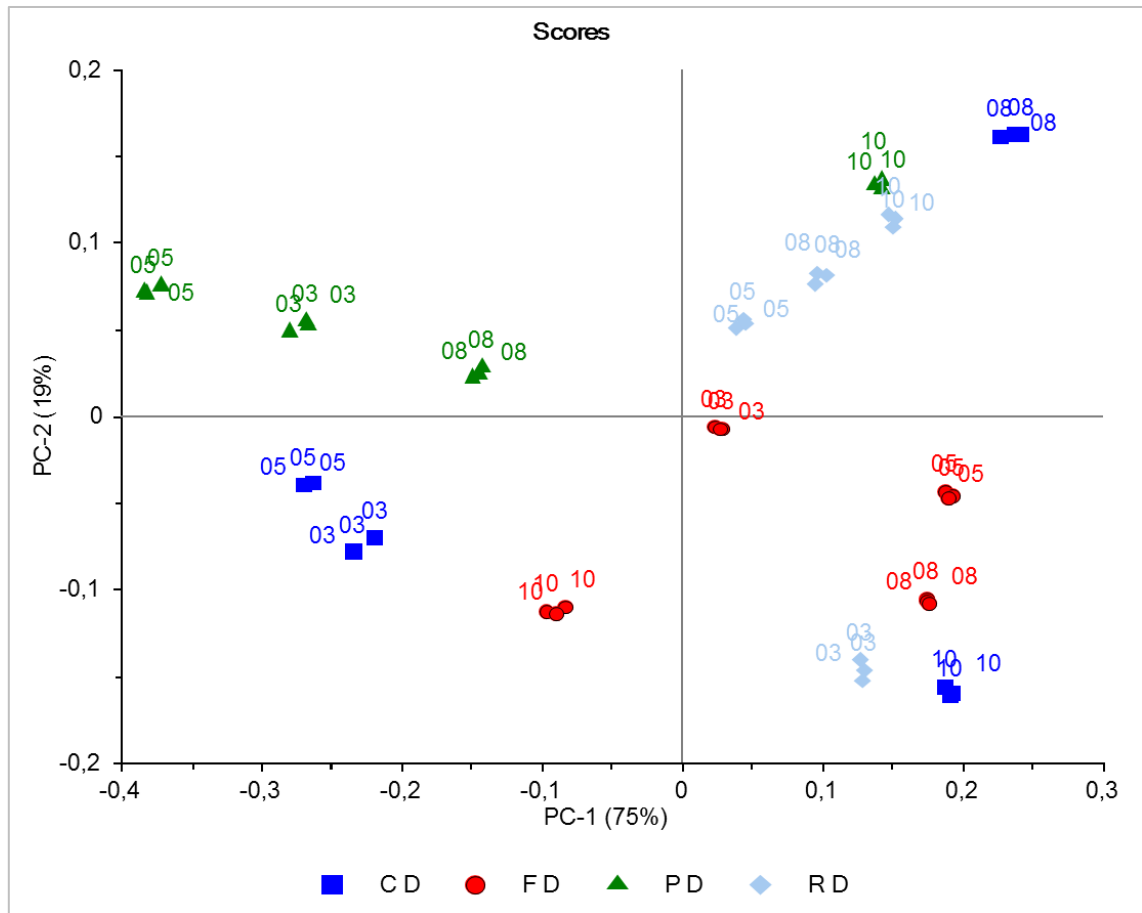


**Figure 50. Pan 1/3 de l'ACP à T0 (n=48 ; variance expliquée = 79%) \_ (C = chêne ; F = frêne ; P = peuplier ; R = robinier)**

La Figure 51 et la Figure 52 permettent également de distinguer des groupes correspondant aux différentes essences à T2 et à T4, avec des détachements de petits groupes correspondants à certains diamètres.



**Figure 51. Plan ½ de l'ACP à T2 (n=48 ; variance expliquée = 86%) \_ (C = chêne ; F = frêne ; P = peuplier ; R = robinier)**



**Figure 52.** Plan ½ de l'ACP à T4 (n=48 ; variance expliquée = 94%) \_ (C = chêne ; F = frêne ; P = peuplier ; R = robinier)

Le plan ½ de l'ACP réalisée au stade de décomposition T6 (Figure 53) permet d'observer que malgré les 80% de variance expliquée sur la PC1, seule la PC2 (13% de variance) nous permet de distinguer les classes de diamètre. Nous retrouvons majoritairement une contribution positive de la PC2 pour les classes de diamètre 08 et 10 et essentiellement une contribution négative de la PC2 pour les classes de diamètres 03 et 05.

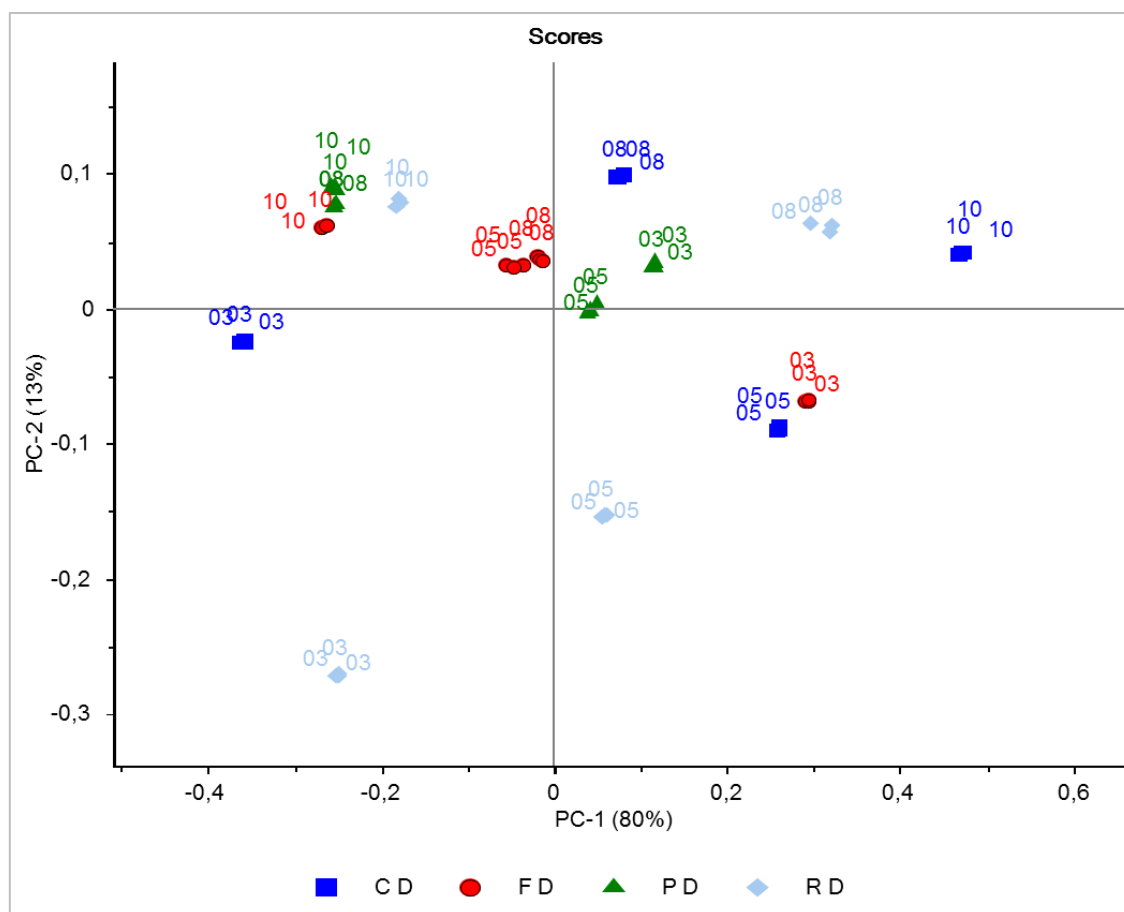


Figure 53. Plan 1/2 de l'ACP à T6 (n=48 ; variance expliquée = 93%) \_ (C = chêne ; F = frêne ; P = peuplier ; R = robinier)

### 2.2.3. Analyses prédictives

Nous disposons actuellement, pour le dispositif expérimental de l'Isère, d'acquisition spectrale de 192 échantillons (4 stades de décomposition \* 4 espèces \* 4 diamètres \* 3 acquisitions SPIR). Pour la prédiction des classes de décomposition et des essences, nous utilisons 128 échantillons pour la calibration et la validation croisée (échantillons préalablement prétraités avec une EMSC) et 64 échantillons pour le modèle prédictif (échantillons sur lesquels nous effectuons également un prétraitement EMSC). Lorsque nous introduisons les échantillons issus de souche prélevées sur les digues de l'Isère en 2013, nous disposons au total de 276 échantillons. Nous utilisons alors 192 échantillons pour la calibration et la validation croisée (prétraités préalablement avec une EMSC) et 84 échantillons pour le modèle prédictif (prétraités avec une EMSC).

Le but de cette analyse est de calibrer un modèle capable d'évaluer, pour un échantillon de racines inconnues, la classe de décomposition à laquelle il appartient et son espèce.

#### 2.2.3.1. Prédiction des classes de « temps de décomposition des racines » (régression PLS-DA)

Des modèles PLS-DA ont été développés pour la prédiction des classes de temps de décomposition (partie 2, chap. 3, section 3.2.3.3). Ces modèles ont permis de prédire chaque classe (T0, T2, T4 et T6) par rapport à toutes les « autres » avec une bonne corrélation ( $R^2$  - proche de 1), une faible erreur de calibration (SEC - proche de 0) et de prédiction (SEP - proche de 0) et un faible biais de prédiction (proche de 0) (Tableau 13).

**Tableau 13 . Statistiques des modèles prédictifs (PLS-DA) pour la prédiction des classes de temps de décomposition**

NIR				
Variables prédites	T0	T2	T4	T6
Nombre de facteurs	12	11	10	14
R <sup>2</sup> (Calibration)	0.919	0.913	0.889	0.946
SEC	0.170	0.177	0.199	0.140
R <sup>2</sup> (Prédiction)	0.922	0.848	0.885	0.947
SEP	0.184	0.231	0.203	0.139
Biais (Prédiction)	0.037	-0.007	-0.025	-0.020

Les matrices de confusion (Tableau 14) montrent que seulement un échantillon a été mal classé.

Pour les classes « T0 », « T2 » et « T6 » aucune erreur n'a été faite. Pour la classe « T4 », nous retrouvons un échantillon classé comme faux-négatif dans « autres ».

**Tableau 14. Matrices de confusion des modèles prédictifs (PLS-DA) pour la prédiction des classes de temps de décomposition (n= 64)**

		n=échantillons	Classes prédites – NIR	
			T0	Autres
Classes réelles	T0	16	16	0
	Autres	48	0	48
			T2	Autres
	T2	16	16	0
	Autres	48	0	48
			T4	Autres
	T4	16	15	1
	Autres	48	0	48
			T6	Autres
	T6	16	16	0
	Autres	48	0	48

### 2.2.3.2. Prédiction des classes « espèces » sur l'ensemble des temps de décomposition (régression PLS-DA)

D'autres modèles PLS-DA ont été développés pour la prédiction des espèces sur l'ensemble des temps de décomposition (T0, T2, T4 et T6). Les statistiques des modèles sont présentées sur le Tableau 15 et les matrices de confusion sur le Tableau 16.

**Tableau 15. Statistiques des modèles prédictifs (PLS-DA) pour la prédiction des classes « espèces »**

NIR				
Variables prédites	Chêne	Frêne	Peuplier	Robinier
<b>Nombre de facteurs</b>	13	14	11	12
<b>R<sup>2</sup> (Calibration)</b>	0.913	0.840	0.887	0.888
<b>SEC</b>	0.177	0.236	0.200	0.200
<b>R<sup>2</sup> (Prédiction)</b>	0.907	0.827	0.882	0.886
<b>SEP</b>	0.184	0.245	0.207	0.203
<b>Biais (Prédiction)</b>	-0.013	-0.007	0.013	-0.007

Les matrices de confusion montrent que les espèces, sur l'ensemble des stades de décomposition, sont moyennement bien classifiées (Tableau 16). En effet, 10 échantillons au total (sur 64) ont été mal classés.

Pour la prédiction de la classe « chêne », nous obtenons un faux négatif et un faux positif. Pour la classe « frêne » nous obtenons deux faux négatifs et un faux positif. Pour la prédiction de la classe « peuplier », il y a trois faux négatifs, soit trois échantillons de peuplier classés comme appartenant à « autres ». Enfin, pour la prédiction de la classe « robinier » deux faux négatifs sont mis en évidence.

**Tableau 16. Matrices de confusion des modèles prédictifs de régression PLS-DA des classes d'espèces (n=64)**

		n=échantillons	Classes prédites – NIR	
			Chêne	Autres
Classes réelles	Chêne	16	15	1
	Autres	48	1	47
			<b>Frêne</b>	
	Frêne	16	14	2
	Autres	48	1	47
			<b>Peuplier</b>	
	Peuplier	16	13	3
	Autres	48	0	48
			<b>Robinier</b>	
	Robinier	16	14	2
	Autres	48	0	48

### 2.2.3.3. Prédiction des classes de « temps de décomposition des échantillons de racines issus de souches » (régression PLS-DA)

Afin de vérifier si un modèle prédictif de régression PLS-DA est capable de classer des échantillons de racine issus de souches d'arbres coupées à une date connue, nous avons réalisé quatre modèles prédictifs (PLS2-DA) pour chaque classe de temps de décomposition puis testé ceux-ci sur des échantillons prélevés sur des souches provenant des digues de l'Isère (38) (partie2, chap.3, section 1). Les échantillons précédemment utilisés pour réaliser le set de prédiction ont cette fois-ci été inclus dans le modèle. Les étapes de calibration et de validation croisée de ces nouveaux modèles de prédiction des classes de décomposition ont donc été réalisées avec 192 échantillons sur lesquels nous avons réalisés un prétraitement EMSC (à partir des spectres bruts de ces échantillons). Pour tester ce modèle en prédiction, nous avons récupéré au total 28 échantillons provenant de souches : 12 échantillons issus de souches coupées en 2009 – 16 échantillons issus de souches coupées en 2008. Soit un total de 84 échantillons : 36 échantillons de 2009 et 48 échantillons de 2008, après trois acquisitions au SPIR sur lesquels un prétraitement EMSC a également été réalisé.

Les statistiques de ces modèles sont assez performantes avec un coefficient de corrélation ( $R^2$ ) à correct et une erreur de calibration assez faible (SEC) (Tableau 17).

**Tableau 17. Statistiques des modèles prédictifs (PLS-DA) pour la prédiction des classes de décomposition des échantillons de racines issus de souches**

NIR				
Variables prédites	T0	T2	T4	T6
Nombre de facteurs	12	11	10	14
$R^2$ (Calibration)	0.920	0.841	0.889	0.946
SEC	0.170	0.235	0.199	0.140

Sur les 84 échantillons de racines issus de souches (Tableau 5), 79 ont été classés dans l'un des quatre stades de décomposition de la banque de données dont nous disposons (Tableau 18).

**Tableau 18. Prédiction des stades de décomposition des échantillons de racines issus de souches à partir des modèles prédictifs PLS-DA développés pour chaque classe de décomposition**

Stade de décomposition	T0	T2	T4	T6
<b>Nom de l'échantillon</b>	2F03 2009 (3) 3F05 2009 (1) 3R03 2008 (3) 3R05 2008 (3) 4R03 2008 (3) 4R05 2008 (2) 4R10 2008 (3) 5F05 2009 (3) 5F08 2009 (2)	1F03 2009 (3) 1F05 2009 (3) 1F08 2009 (3) 1F10 2009 (3) 2F03 2009 (3) 2F05 2009 (3) 4R03 2008 (3) 5F03 2009 (3) 5F05 2009 (3) 5F08 2009 (3) 5F10 2009 (3)	1C03 2008 (3) 1C05 2008 (3) 1C08 2008 (3) 5F05 2009 (3) 5R03 2008 (3)	2F05 2009 (3) 3R03 2008 (2) 3R05 2008 (3)
<b>Nombre total classé</b>	23	33	15	8

(Code de l'échantillon (1, 2, ...n) +F= frêne, P = peuplier ; R = robinier ; C = chêne + 03 ; 05 ; 08 et 10 = diamètres + date de coupe de l'arbre + (n) nombre d'échantillons classifiés)

La date de coupe d'un arbre ne signifiant pas sa mort, surtout si ce dernier présente des rejets, il est normal que nous trouvions des échantillons classés en T0 et T2 (Tableau 18). Pour les échantillons classés en T4 et en T6 (Tableau 18), nous retrouvons :

- le chêne (en T4) qui présentait de petits rejets quasiment mort lors du dessouchage en 2013. Cet arbre avait la particularité de ne pas être mature (petit arbre dont la souche ne dépassait pas 10 cm de diamètre) ce qui peut impliquer une décomposition plus avancé de son système racinaire bien que des rejets étaient présents ;
- le frêne (5F05) classé en T4 qui est retrouvé également en T0 et T2 ;
- le robinier (5R) classé en T4 qui n'avait pas de rejet apparent en 2013 ;
- le robinier (3R) classé en T6 ;
- le frêne (2F05) classé en T6 mais qui est retrouvé également en T2.

Nous retenons de ces tests sur des racines issues de souche que la date de coupe de l'arbre ne signifie pas la mort de ce dernier et donc le début de la décomposition de son système racinaire. La mort réelle d'un arbre doit pouvoir être estimé au moins approximativement (au vu de l'état de la souche ou de la présence de rejet) pour pouvoir classer l'état de décomposition de ces racines dans l'un des stades que nous avons étudiés.



### 3. Synthèse

Les mesures qualitatives et quantitatives d'échantillons de racines ligneuses ont permis d'apporter des connaissances en fonction de trois principaux facteurs : le stade de décomposition, l'espèce et le diamètre d'une racine.

Pour les échantillons de racines issus du dispositif de l'Isère, les mesures qualitatives donnent des tendances vis-à-vis de la vitesse de décomposition. A l'issue de ces mesures nous pouvons émettre l'hypothèse que le chêne et le frêne ont une évolution de décomposition plus lente que le peuplier et le robinier entre T0 et T4. Par contre, nous observons une dégradation générale de l'ensemble des espèces entre T4 et T6.

L'analyse quantitative de perte de densité sèche montre que celle-ci diminue au cours de la décomposition des échantillons. Les tests statistiques effectués ne montrent globalement pas de différences significatives entre les différents stades de décomposition. La perte de densité semble donc s'effectuer progressivement sans pallier « franc » entre les différents stades.

L'évolution de la dégradation de la composition chimique des échantillons de racines au cours de leur décomposition est appréhendée par la spectrométrie proche infrarouge (SPIR). La méthodologie et les traitements développés ont permis de montrer que la composition chimique du bois des racines évolue au cours de sa décomposition. Ainsi, nous avons été capables d'une part de discriminer les échantillons de racines constituant notre base de données en fonction de trois facteurs : le stade de décomposition, l'espèce et le diamètre et d'autre part, de prédire l'appartenance d'un échantillon de racine inconnu à une classe de décomposition ou une espèce d'arbre à partir d'une régression PLS. L'analyse par SPIR nous a également permis d'observer l'évolution des proportions des composés chimiques (cellulose, hémicellulose, lignine) au cours de la décomposition.

Les analyses qualitatives et quantitatives se complètent. Les tendances sur l'évolution de la vitesse de décomposition sont apportées par les analyses qualitatives et l'analyse quantitative de perte de densité sèche. L'analyse quantitative par SPIR nous permet de déterminer l'appartenance d'un échantillon inconnu à l'un des stades de décomposition discriminé sur la base de données actuelles.

Les résultats obtenus pour les échantillons issus du dispositif expérimental de Castérino situé dans les Alpes-Maritimes illustrent des différences moins marquées entre les stades de décomposition que pour les échantillons issus du dispositif de l'Isère (ANNEXE 2). Ce dispositif situé en milieu montagnard dispose d'échantillons de racines de deux espèces de conifère : le pin sylvestre et le mélèze. Une partie des échantillons ont été récoltés après 2 ans (T2) et 4 ans (T4) de décomposition. Les résultats des analyses qualitatives ne montrent pas de différences flagrantes entre les stades de décomposition. De même, les analyses quantitatives ne montrent pas d'importante perte de densité sèche entre les stades T0, T2 et T4. D'autre part, l'analyse par SPIR discrimine moins bien les échantillons en fonction de ces trois stades. Nous pouvons émettre deux hypothèses à l'issue de ces résultats :

- la vitesse de décomposition des racines ligneuses est plus lente dans un milieu montagnard qu'un milieu semi-continentale (dispositif de l'Isère) ;
- la vitesse de décomposition des racines ligneuses est plus lente lorsque les espèces sont des conifères.

Ces deux hypothèses peuvent être combinées pour expliquer les résultats obtenus.

Les modèles prédictifs réalisés sur les échantillons de Castérino sont bons. Les performances des deux modèles (pour la prédiction des stades de décomposition (Tableau 37) et pour la prédiction des espèces (Tableau 39)) sont bonnes. Les matrices de confusion montrent que les échantillons sont bien classés autant pour la prédiction des stades de décomposition (Tableau 38) que pour les espèces (Tableau 40).

## Chapitre 2. Identification et formalisation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente

Nous souhaitons prendre en compte la présence de végétation arborescente dans les modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques vis-à-vis des mécanismes de détérioration potentiellement influencés ou aggravés par celle-ci. Il s'agit donc dans un premier temps d'identifier et formaliser les informations importantes relevant de ce type de végétation. Sur la base de la problématique énoncée (partie 1, chap. 2) et des méthodes exposées en partie 2 (chap.2), ce chapitre présente les résultats obtenus lors de l'identification et la formalisation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente. Ces indicateurs seront ensuite utilisés en combinaison avec d'autres indicateurs pour évaluer la performance des ouvrages.

### 1. Identification des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente

Afin d'évaluer la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire et à charge permanente vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne et par affouillement (uniquement pour les ouvrages à charge temporaire) du fait de la présence de végétation arborescente, une analyse fonctionnelle externe centrée sur l'élément extérieur « végétation arborescente » a en premier lieu été réalisée. Ce travail préliminaire d'énumération permet de cerner les différentes contraintes liées à la présence de végétation sur l'ouvrage (contraintes pouvant initier ou aggraver un mécanisme de détérioration par érosion interne ou par affouillement). Nous avons alors identifié l'ensemble des configurations possibles combinant l'ouvrage hydraulique et la végétation arborescente.

Chacun des deux types d'ouvrages a été divisé en zones sur un profil en travers. Ce découpage est donné à titre de simplification, il ne tient pas compte des proportions de l'ouvrage mais du découpage du profil en travers en fonction de l'implantation potentielle de la végétation arborescente et de son comportement probable. La Figure 54 et la Figure 55 présentent respectivement le découpage en cinq zones d'un ouvrage hydraulique à charge temporaire et en quatre zones d'un ouvrage hydraulique à charge permanente non équipé de drains ni d'instruments d'auscultation.

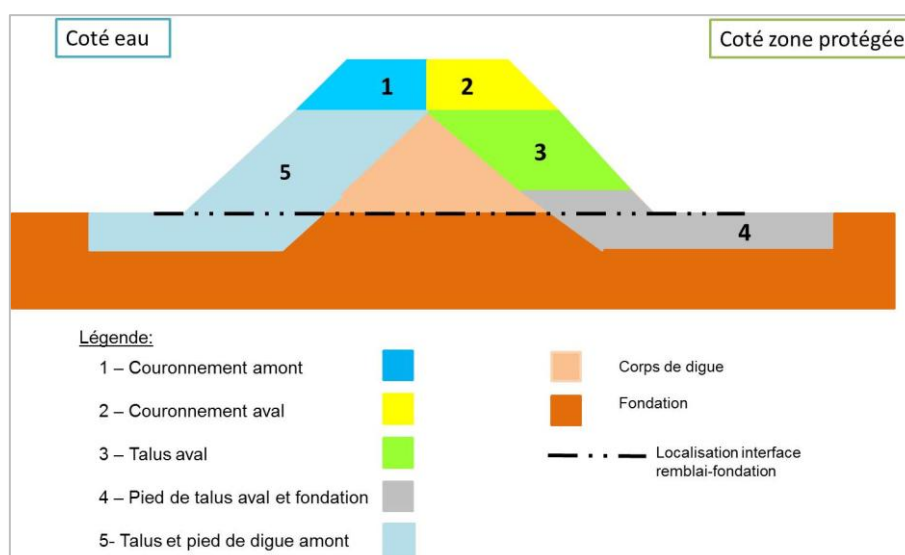
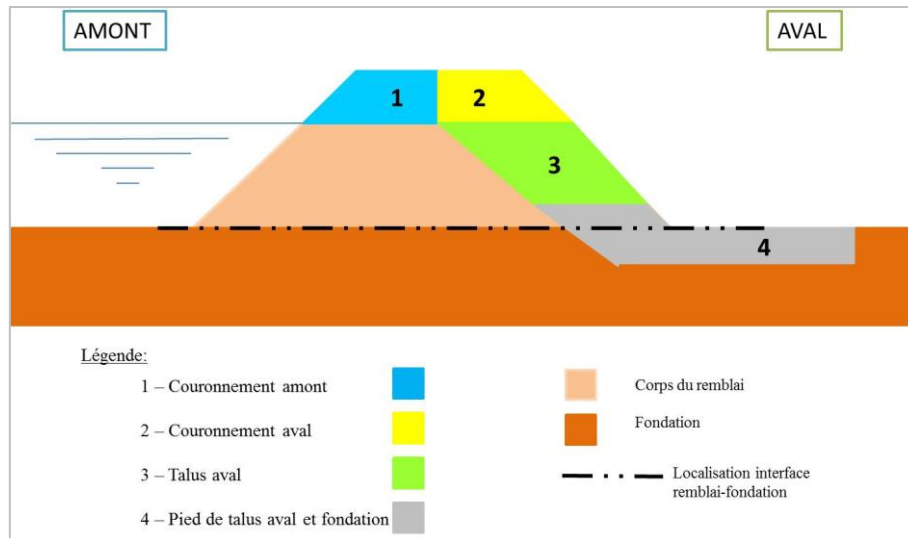


Figure 54. Découpage d'un ouvrage hydraulique à charge temporaire en remblai homogène



**Figure 55. Découpage d'un ouvrage à charge permanente en remblai homogène non équipé de drains, ni d'instruments d'auscultation et où l'implantation de la végétation n'est pas possible sur le parement amont sauf sur le couronnement (zone1)**

Dans un second temps, l'analyse fonctionnelle interne nous a permis d'identifier les fonctions de résistance que doit posséder un ouvrage hydraulique vis-à-vis des contraintes liées à la présence de végétation ligneuse. Trois types de fonctions sont concernés :

- La fonction « *résister aux sollicitations mécaniques* » ;
- La fonction « *limiter les flux hydrauliques* » ;
- La fonction « *évacuer les flux hydrauliques* » pour le cas particulier des ouvrages hydrauliques à charge permanente équipés de drains pouvant être colmatés par la présence de racines ligneuses.

Une analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) spécifique à la problématique de la végétation arborée présente sur les ouvrages hydrauliques en remblai a ensuite été réalisée. Cette AMDE a permis d'identifier les indicateurs d'état des ouvrages, eux-mêmes issus des indicateurs des causes et des effets des défaillances des différentes parties du système. Il en résulte un tableau synthétique rassemblant « zones de l'ouvrage sur un profil en travers », « fonctions » et « indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente » associés. Le tableau de synthèse associé à la zone 1 « Couronnement amont » d'un ouvrage est présenté sur le Tableau 19 ci-dessous. Les tableaux de synthèse pour les autres zones d'un ouvrage sont consultables en ANNEXE 4.

**Tableau 19. Extrait du tableau de synthèse de l'AMDE rassemblant les indicateurs associés à chaque fonction pour la partie N°1 « couronnement amont » d'un ouvrage hydraulique à charge temporaire ou à charge permanente**

N°	Zones de l'ouvrage	Fonctions	Indicateurs d'état
1	Couronnement amont	1 – Résister aux sollicitations mécaniques	
		1.1 Résister à la déstructuration du remblai	Densité des individus ayant traversé la protection amont
		1.2 Résister à l'affouillement	Port des arbres Aspect <sup>6</sup> de la population d'arbres
		2 – Limiter les flux hydrauliques	
		2.1 Limiter les eaux d'infiltration sur le couronnement amont	Densité d'individus Volume racinaire par individu Type de structure racinaire par individu Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu

Le déploiement des méthodes de la sûreté de fonctionnement nous a permis **d'identifier huit indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborée** (rappelons que nous nommons indistinctement, par le terme « individus », les arbres et les souches d'arbres) :

- *Densité des individus ayant traversé la protection amont d'un ouvrage hydraulique ;*
- *Port des arbres ;*
- *Aspect de la population d'arbres ;*
- *Densité des individus ;*
- *Volume racinaire par individu ;*

<sup>6</sup> Le terme « Aspect » relatif à l'indicateur d'état «Aspect de la population d'arbres » désigne « l'allure » générale de la population d'arbres présente sur le profil ou tronçon de l'ouvrage à analyser.

- *Type de structure racinaire par individu ;*
- *Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu ;*
- *Etat visuel de l'environnement à l'exutoire du tapis drainant.*

Le Tableau 20 indique sur quelles zones de l'ouvrage chaque indicateur est évalué. Rappelons que la zone 5 n'est utilisée que pour l'évaluation des ouvrages hydrauliques à charge temporaire, elle inclue le talus et le pied de digue côté cours d'eau.

**Tableau 20. Zone de l'ouvrage potentiellement évaluée par les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente**

Indicateurs d'état	Partie de l'ouvrage concerné par l'évaluation de l'indicateur d'état correspondant				
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Densité des individus ayant traversé la protection	X				X
Port des arbres	X				X
Densité des individus	X	X	X	X	X
Volume racinaire par individu	X	X	X	X	X
Type de structure racinaire des individus	X	X	X	X	X
Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu	X	X	X	X	X
Etat visuel de l'environnement à l'exutoire du tapis drainant				X	

En fonction du type d'ouvrage hydraulique (à charge permanente ou temporaire) et du mécanisme de détérioration vis-à-vis duquel nous souhaitons évaluer l'ouvrage, nous nous intéressons plus spécifiquement à certains de ces indicateurs. Le Tableau 21 liste ces indicateurs spécifiques à la végétation arborescente en fonction du type d'ouvrage évalué et du mécanisme de détérioration considéré.

**Tableau 21. Indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente identifiés pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire ou permanente selon le mécanisme de détérioration considéré**

	Ouvrage hydraulique à charge temporaire	Ouvrage hydraulique à charge permanente
Mécanisme de détérioration par érosion interne	Densité des individus Volume racinaire par individu Type de structure racinaire par individu Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu	Densité des individus Volume racinaire par individu Type de structure racinaire par individu Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu Etat visuel de l'environnement à l'exutoire du tapis drainant (si barrage équipé de drains)
Mécanisme de détérioration par affouillement	Densité des individus ayant traversé la protection amont du corps de l'ouvrage Port des arbres Aspect de la population d'arbres	

## 2. Formalisation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente

L'ensemble des indicateurs identifiés ci-dessus a été formalisé selon la grille présentée dans la partie 2 (partie 2, chap. 2, section 2) où les références de chaque indicateur ont été établies au cours des séances d'expertise. Nous donnons un exemple de formalisation complète pour l'indicateur d'état « *Densité des individus* ». Nous ne pouvons, pour des raisons de confidentialité donner les grilles des autres indicateurs d'état mais nous présentons de manière plus détaillée chacun de ces indicateurs. Les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne sont communs aux ouvrages hydrauliques à charge temporaire et permanente, à l'exception de l'indicateur d'état « *Etat visuel de l'environnement de l'exutoire du tapis drainant* » qui est spécifique aux ouvrages hydrauliques à charge permanente équipés d'un système de drainage. Les indicateurs d'état relevant du mécanisme de détérioration par affouillement sont actuellement spécifiques aux ouvrages hydrauliques à charge temporaire (nous n'évaluons pas la performance des ouvrages hydrauliques à charge permanente vis-à-vis de ce mécanisme).

### 2.1. Indicateur d'état « densité des individus »


L'indicateur d'état « *Densité des individus* » est appréhendé visuellement in situ par la personne en charge de l'évaluation de la performance vis-à-vis du mécanisme de détérioration par **érosion interne**. C'est donc un **indicateur d'état visuel** issu d'appréciations qualitatives.

La densité des individus présents sur l'ouvrage analysé témoigne indirectement de l'emprise des racines dans le remblai ou à ses abords. L'apparition d'une érosion interne peut être favorisée ou aggravée par la présence de racines ligneuses qui constituent des zones d'hétérogénéité et de perméabilité dans le remblai notamment lors de la décomposition de celles-ci.

L'indicateur d'état « *Densité des individus* » est donc le premier indicateur à prendre en compte. Si aucun individu (arbre ou souche) n'est présent sur l'ouvrage, on donnera une note de 10 à cet indicateur et il sera inutile de s'intéresser aux autres indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente. Dans le cas où la végétation arborescente est présente, l'utilisateur choisira le profil (ou

tronçon homogène pour l'évaluation d'un ouvrage hydraulique à charge temporaire) le plus défavorable, c'est-à-dire où la densité des individus est la plus élevée, pour réaliser l'évaluation de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne. Cependant, pour un ouvrage hydraulique à charge permanente de courte longueur de type barrage, si la répartition de la végétation arborescente est équivalente sur l'ensemble du remblai, la géométrie du remblai la plus défavorable (largeur en crête étroite, pente de talus raide) sera considérée dans le choix du profil à évaluer. Nous présentons sur le Tableau 22 la grille de formalisation de l'indicateur « *Densité des individus* » qui est utilisée pour évaluer ce dernier. La notation est réalisée en fonction du nombre d'individus présents sur 10 m<sup>2</sup>.

**Tableau 22. Grille de formalisation pour l'indicateur d'état « *Densité des individus* »**

Nom	Densité des individus
<i>Définition</i>	Plus la densité des individus est élevée, plus les hétérogénéités de perméabilité dans le remblai peuvent apparaître, notamment lors de la décomposition des systèmes racinaires. (On regarde prioritairement les gros arbres pour cet indicateur).
<i>Mode opératoire</i>	La mesure de cet indicateur s'effectue sur le terrain en relevant (pour chaque profil analysé) le nombre d'individus présents sur 10m <sup>2</sup> . Le profil le plus défavorable vis à vis du mécanisme de détérioration est choisi.
<i>Echelle et références</i>	 <p>10 : absence d'individus            5-4 : présence d'un individu par 10 m<sup>2</sup>            3-2 : présence de 2 à 5 individus par 10 m<sup>2</sup>            1-0 : présence &gt; 5 individus par 10 m<sup>2</sup></p>
<i>Caractéristiques de lieu</i>	Profil de l'ouvrage analysé
<i>Caractéristiques de temps</i>	Evaluation réalisée lors d'une inspection visuelle axée sur la qualification de la végétation présente sur l'ouvrage.

## 2.2. Volume racinaire par individu

Le volume racinaire par individu est le second indicateur d'état à évaluer pour déterminer la performance d'un ouvrage hydraulique vis-à-vis du mécanisme de détérioration par **érosion interne**. Il permettra d'appréhender, avec l'indicateur d'état « *Densité des individus* », le volume racinaire global présent sur le profil analysé. Sachant que les systèmes racinaires croissent avec l'âge de l'arbre, un individu dont la souche possède un diamètre important laisse supposer un volume racinaire important. Le diamètre au collet de l'arbre ou de la souche (Figure 56) est ainsi mesuré sur le terrain.





**Figure 56. Mesure du collet d'un arbre (en rouge) pour la notation de l'indicateur d'état « Volume racinaire par individu »** (photo : Bambara G., 2013)

L'échelle d'évaluation permet de donner une note en fonction du diamètre. Ce paramètre est important pour prévoir les conséquences en termes d'augmentation globale de la perméabilité du remblai lors de la décomposition du système racinaire.

L'indicateur d'état « *Volume racinaire par individu* » peut être considéré comme un **indicateur d'état calculé** qui est issu d'une mesure simple in situ. Nous extrapolons simplement ce volume en fonction du diamètre des gros individus présent sur le profil qui est évalué.

### 2.3. Type de structure racinaire des individus

L'indicateur d'état « *Type de structure racinaire des individus* » est un indicateur important à appréhender par l'utilisateur du modèle afin de disposer d'une caractérisation racinaire globale au droit du profil analysé.

La structure racinaire des arbres peut être qualifiée d'« opportuniste » vis-à-vis des contraintes liées aux caractéristiques du sol et de l'accès des racines à l'eau et aux nutriments. Les différents types de structures racinaires peuvent être plus ou moins préjudiciables vis-à-vis du mécanisme **d'érosion interne** lors de la décomposition des racines ligneuses. Ainsi, un système racinaire doté de longues racines horizontales pouvant potentiellement traverser le remblai sera particulièrement problématique. La décomposition de ce type de racines créera vraisemblablement un conduit à travers le remblai (selon le type de matériau), susceptible d'initier une érosion interne de conduit.

Cet indicateur d'état est évalué en conjonction avec les différents paramètres influençant la structure du système racinaire (type de sol, accès à l'eau...). On utilise alors une clef d'aide à l'identification de la structure racinaire qu'un individu est susceptible d'avoir développée. Cette clé hiérarchise les différents paramètres « externes » qui déterminent potentiellement le type de structure racinaire. Ainsi, nous retrouvons principalement :

**La granulométrie du matériau** (fin ou grossier) qui est un paramètre prépondérant vis-à-vis de l'orientation du système racinaire à adopter un type de structure. En effet, la granulométrie du matériau conditionne la **capacité de rétention en eau du sol** et sa **capacité à accumuler des éléments nutritifs et de la matière organique**. Par exemple, sur la base des nombreuses observations réalisées au cours des travaux de Zanetti (2008), le système racinaire « fasciculé » n'est pas trouvé sur un remblai constitué de matériaux grossiers. A l'inverse, le système racinaire « pivotant » n'a jamais



été observé sur un remblai constitué par des matériaux fins. De plus, sur un remblai constitué de matériaux grossiers, le système racinaire pivotant ou mixte ne se trouve que dans le cas où l'accès à l'eau et aux nutriments est possible en profondeur.

**Les différentes zones de l'ouvrage**, cinq pour les ouvrages hydrauliques à charge temporaire et en quatre pour les ouvrages hydrauliques à charge permanente ne sont pas des déterminants absolus dans le type de structure racinaire. Par exemple : le milieu du talus d'une digue très haute sera plus loin d'une nappe proche de la surface du terrain naturel que la crête d'une petite digue. Des systèmes racinaires différents pourront se développer suivant que l'on se trouve en haut ou en bas d'une zone 4 sur une digue de grande taille en raison de l'accès direct au sol naturel en bas du talus. La zone 5 comprend à la fois des parties de talus et du sol naturel qui peuvent avoir des caractéristiques très différentes en granulométrie et richesse en matières organiques et donc présenter des types de structures racinaires différentes, etc...

La Figure 57 présente la clé d'aide à l'identification développée pour les ouvrages hydrauliques en remblai (Zanetti et al., 2015).

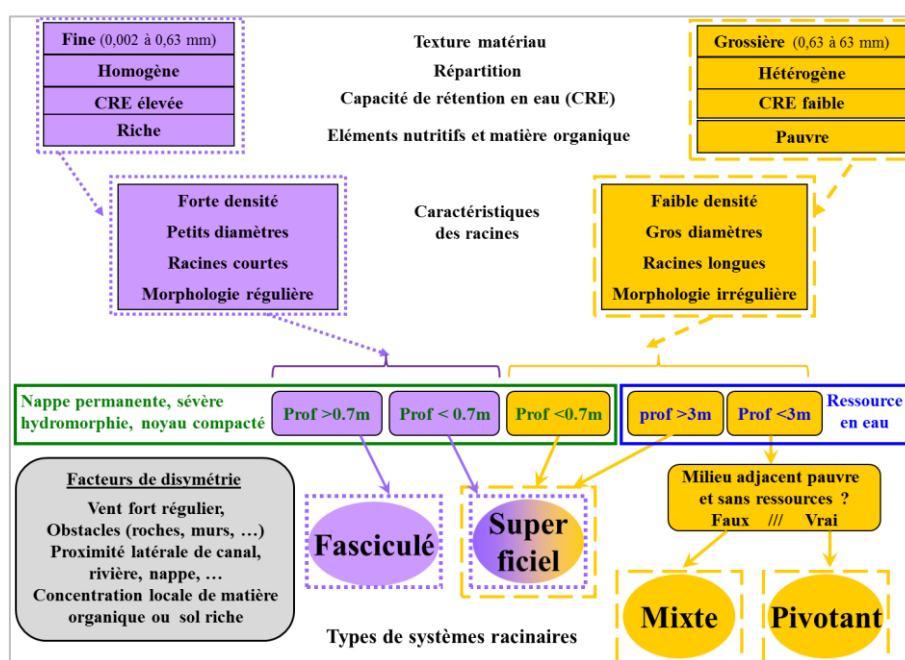


Figure 57. Clé d'aide à l'identification de la structure racinaire d'un individu (Zanetti et al., 2015)

Cette clé a été développée au cours des travaux de recherche de Zanetti & al (2015) présentés dans l'International Levee Handbook (Sharp et al., 2013). En fonction du type de structures racinaires identifiées, l'utilisateur se référera aux références établies dans la grille de formalisation.

Cet indicateur d'état peut être considéré comme un **indicateur d'état déduit** à partir de différentes mesures : appréciations visuelles (position sur l'ouvrage, accès à l'eau) et mesures instrumentales ou calculées (position de la nappe phréatique, type de matériaux).

#### 2.4. Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu

L'indicateur d'état «*Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu*» a été identifié par le groupe d'experts comme étant un indicateur important pour l'évaluation de la propension aux écoulements dans un ouvrage hydraulique en remblai et donc pour l'évaluation d'un ouvrage vis-à-vis du mécanisme de détérioration par **érosion interne**. Cet indicateur ne peut être obtenu à partir d'une information directement accessible, il **est donc issu de mesures indirectes**. A partir des dispositifs expérimentaux décrits dans la partie 2 (chap.3, section 1) et des résultats issus des

méthodes d'évaluation qualitatives et quantitatives de la décomposition des racines ligneuses (partie 3, chap.1), nous avons pu proposer une formalisation de cet indicateur.

Les méthodes d'évaluation qualitative nous ont permis de corrélérer la vitesse de décomposition des échantillons de racines avec l'espèce et le diamètre auquel ils appartiennent. Nous avons pu également appréhender les vitesses d'évolution entre les stades de décomposition des échantillons d'espèces différentes et provenant de zones géographiques différentes (entre T0, T2, T4, T6 pour les feuillus et entre T0, T2 et T4 pour les conifères). L'analyse quantitative de perte de densité sèche nous a permis également d'obtenir des tendances de vitesse de décomposition en fonction de la zone géographique (dispositif étudié), de l'espèce et du diamètre des échantillons. L'analyse par SPIR nous permet quant à elle d'approfondir nos connaissances vis-à-vis de la variabilité chimique qui existe entre des échantillons de différents stades de décomposition, de différentes espèces et différents diamètres. Ces travaux de recherche nous ont permis d'apporter des connaissances supplémentaires sur l'évolution de la décomposition des racines ligneuses implantés dans les ouvrages hydrauliques. Les résultats obtenus ont permis au groupe d'experts d'établir les références de l'indicateur d'état « *Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu* ». Ces références seront améliorées au fur et à mesure de la poursuite des études menées sur la décomposition des racines.

En résumé, les références établies dépendent :

- de la zone géographique et donc du type de climat où l'ouvrage hydraulique est évalué vis-à-vis de cet indicateur d'état. Les données issues du dispositif de l'Isère servant à l'évaluation d'un ouvrage présent dans un milieu semi-continentale et les données issues du dispositif de Castérino servant à l'évaluation d'un ouvrage présent dans un milieu montagnard ;
- du temps de décomposition de la souche et des racines ligneuses évalués. Il est nécessaire de connaître la date de mort de l'arbre. Actuellement nous disposons d'informations sur l'état de décomposition des racines ligneuses allant jusqu'à 6 années de décomposition pour les espèces issues du dispositif de l'Isère soit pour un milieu semi-continentale et 4 années de décomposition pour les espèces issues du dispositif de Castérino soit pour un milieu montagnard ;
- de l'espèce d'arbre à évaluer : actuellement le suivi de la décomposition a été réalisé pour 6 espèces. Quatre feuillus – dispositif de l'Isère (chêne, frêne, robinier faux-acacia et peuplier) et deux espèces de conifères – dispositif de Castérino (mélèze et pin sylvestre).

## 2.5. Etat visuel de l'environnement à l'exutoire du tapis drainant

L'indicateur d'état « *Etat visuel de l'environnement à l'exutoire du tapis drainant* » est un indicateur d'état qui a été identifié pour l'évaluation de la performance d'un ouvrage hydraulique à charge permanente équipé d'un tapis drainant.

Cet indicateur d'état est apprécié par la densité des individus présents à l'exutoire du tapis drainant. Il a donc les mêmes références que celles établies pour l'indicateur d'état « *Densité des individus* » (Tableau 22). En effet, plus la densité d'arbres est élevée, plus le risque de colmatage du drain peut être élevé.

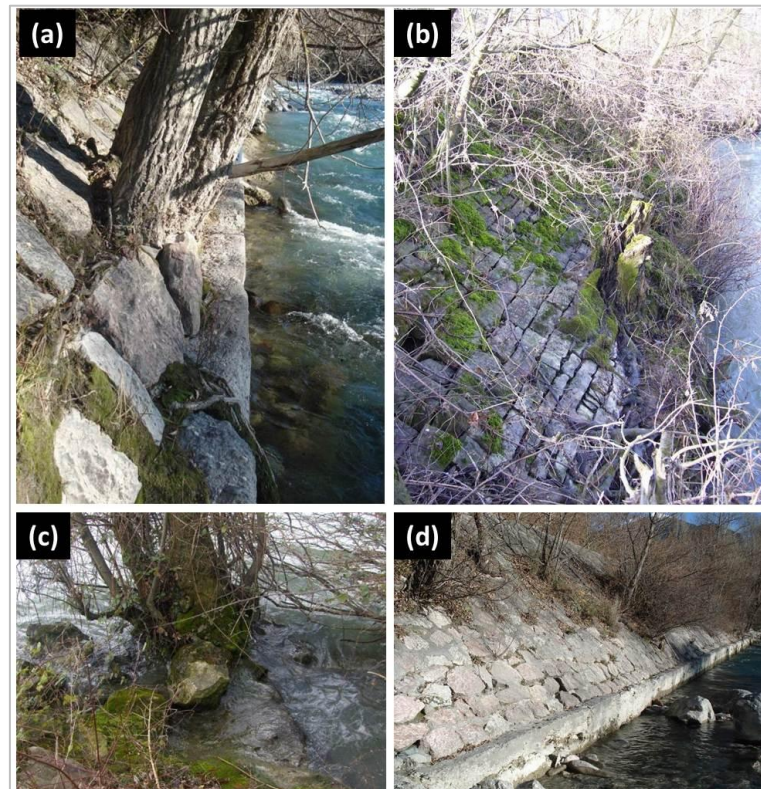
Il est considéré comme un **indicateur d'état visuel**.

## 2.6. Densité des individus ayant traversé la protection du corps de digue

Cet indicateur d'état est employé pour l'évaluation de la performance d'un ouvrage hydraulique à charge temporaire (digue fluviale) vis-à-vis du mécanisme de détérioration par **affouillement** du fait de la présence de végétation arborescente.

L'indicateur « *Densité des individus ayant traversé la protection du corps de digue* » permet d'apprécier la déstructuration de la protection qui se trouve côté cours d'eau de l'ouvrage. En effet, l'action mécanique des racines est défavorable pour l'intégrité de la protection. Plus le nombre d'individus qui ont traversé la protection du corps de digue est élevé, plus la déstructuration de la protection peut s'avérer importante. La Figure 58 permet d'illustrer différents cas de déstructuration plus ou moins importante de différents dispositifs de protection.

La notation de cet indicateur est réalisée en fonction du nombre d'individus ayant traversé la protection du corps de digue côté amont sur une aire de 100 m<sup>2</sup>. C'est donc un indicateur issu d'observations visuelles que l'on peut qualifier d'**indicateur d'état visuel**.



**Figure 58. Illustration de différents cas de déstructuration plus ou moins importante de protection du corps d'ouvrage (a) Soulèvement des blocs de pierre taillés du perré maçonné par un saule arborescent sur le Guil (b) Perré non jointoyé en cours de déstructuration par l'action des arbres et de leur racines au bord de la Sarre (photos : Mériaux P.) (c) enrochement de protection colonisé par les arbres et déstructuration des blocs (d) Arbres et arbustes installés sur le perré jointoyé de la digue rive droite du Guil à Eyglies (05), sans indice majeur de déstructuration (photo : Mériaux P.)**

## 2.7. Port des arbres

L'indicateur d'état « *Port des arbres* » est également un indicateur d'état important à prendre à compte lorsqu'il s'agit d'évaluer la performance d'un ouvrage hydraulique vis-à-vis du mécanisme de détérioration par **affouillement**.

Selon leur position sur le talus côté eau de l'ouvrage et la direction du vent, les arbres peuvent avoir un port déséquilibré. Le risque de chute de ces arbres avec (chablis) ou sans déracinement (volis) est donc plus élevé que pour un arbre au port droit. Le mécanisme de détérioration par affouillement peut ainsi être aggravé par la présence de chablis qui ont emporté une partie plus ou moins importante de la protection de l'ouvrage et de ses matériaux constitutifs. La Figure 59 permet d'illustrer ce que l'on entend par « port déséquilibré » des arbres, bien que cette photo illustre la présence de ce type d'arbre non pas sur une digue de protection fluviale mais sur un ouvrage à charge permanente.



La notation de cet indicateur est réalisée à partir d'observations visuelles : les références ont été établies sur la base de la densité des arbres ayant un port déséquilibré et ce, associée à leur âge (petits ou gros arbres). Cet indicateur d'état **visuel** permet d'anticiper l'impact de la végétation arborescente sur la dégradation de l'état de la protection du corps de digue côté cours d'eau.



**Figure 59. Illustration d'arbres de haute tige, au port dangereusement penché, se développant au-dessus du niveau normal des eaux d'un petit barrage d'étang et ayant tendance à déstructurer la protection anti-batillage, ici par pieux-bois (photo : Mériaux P.)**

### *2.8. Aspect de la population d'arbres*

L'indicateur d'état « *Aspect de la population d'arbres* » est utilisé pour l'évaluation de la performance d'un ouvrage hydraulique à charge temporaire vis-à-vis du mécanisme de détérioration par **affouillement**.

Pour la notation de cet indicateur d'état, on regarde l'aspect général de la population d'arbres présente sur le tronçon de la digue à diagnostiquer : sa densité, le port des arbres (droit ou déséquilibré), les arbres renversés. Cet indicateur d'état « *Aspect de la population d'arbres* », est utilisé non pas pour l'évaluation de la performance du critère fonctionnel « **résistance à l'affouillement de la protection du corps de digue** » comme les indicateurs d'état « *Densité des individus ayant traversé la protection du corps de digue* » ou « *Port des arbres* », mais pour l'évaluation de la performance du critère fonctionnel « **résistance à l'affouillement du corps de digue** », notamment pour les ouvrages qui ne possèdent pas de protection rigide. La dégradation du corps de digue, par rapport à l'état actuel de celui-ci vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement, est réalisé en fonction de l'indicateur d'état « *Aspect de la population d'arbres* ».

Cet indicateur est également un **indicateur d'état visuel**.

## **3. Synthèse**

Nous avons, à l'aide des méthodes de la sûreté de fonctionnement puis du recueil et de la formalisation des connaissances, identifié et formalisé au total **huit indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente**. Parmi ces indicateurs, certains permettent d'améliorer l'évaluation de la performance d'un ouvrage vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne et d'autres vis-à-vis du mécanisme d'affouillement (respectivement 5 indicateurs pour l'érosion interne dont l'un

caractéristique uniquement des ouvrages hydrauliques à charge permanente et 3 indicateurs pour l'affouillement).

Ces indicateurs d'état sont issus de différentes mesures ou observations. Nous totalisons :

- **5 indicateurs issus d'observations visuelles** : « *Densité des individus* », « *Etat visuel de l'environnement à l'exutoire du tapis drainant* », « *Densité des individus ayant traversé la protection amont du corps de l'ouvrage* », « *Port des arbres* », « *Aspect de la population d'arbres* » ;
- **1 indicateur calculé** : « *Volume racinaire par individu* » ;
- **1 indicateur déduit** à partir de différents paramètres : « *Type de structure racinaire par individu* ». Rappelons que cet indicateur est déduit à partir des caractéristiques du sol dans lequel le système racinaire se développe, soit : la texture du matériau, la répartition des grains (homogène ou non), la capacité de rétention en eau du remblai, les éléments nutritifs disponibles, la localisation de la ressource en eau la plus proche, la nature de l'ouvrage (en remblai homogène ou avec un noyau étanche) (cf. Figure 57) ;
- **1 indicateur issu du développement de mesures indirectes** : « *Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu* ».

Ce dernier point constitue l'une des originalités que nous avons obtenues au cours de nos travaux. L'utilisation à titre exploratoire de méthodes qualitatives (classes de dégradation visuelles, test de résistance à l'enfoncement d'une lame de couteau) et quantitatives classiques (estimation de la perte de densité des échantillons au cours du temps) puis un travail plus poussé autour de la spectrométrie proche infrarouge et des outils chimométriques ont permis de donner une tendance d'évolution dans le temps de la décomposition de racines pour différentes espèces végétales et dans différentes conditions climatiques. Ces mesures ont servi à décrire, à partir de l'échelle de notation retenue, les références de l'indicateur.

En fonction de ces indicateurs spécifiques, leur évaluation est faite soit en considérant les individus qui incluent les souches et les arbres vivants (cas des indicateurs d'état : « *Densité des individus* », « *Volume racinaire par individu* », « *Etat visuel de l'environnement à l'exutoire du tapis drainant* », « *Densité des individus ayant traversé la protection amont du corps de l'ouvrage* »), soit en considérant les souches et les arbres morts (cas de l'indicateur d'état « *Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu* ») ou encore les arbres uniquement (cas des indicateurs d'état « *Port des arbres* » et « *Aspect de la population d'arbres* »).

L'évaluation de ces indicateurs est réalisée par l'utilisateur du modèle à partir d'une échelle de notation unique et de la grille de formalisation établie pour chacun d'entre eux. Ces indicateurs constituent in fine une partie des données d'entrée des modèles d'évaluation de la performance présentés dans les chapitres suivants.

## Chapitre 3. Evaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne et affouillement en présence de végétation arborescente

Ce chapitre présente les modèles que nous avons développés pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire, tel que les digues de protection contre les inondations en remblai homogène, vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne et affouillement en présence de végétation arborescente. Ces modèles sont totalement utilisables même en l'absence de végétation arborescente.

### 1. Evaluation vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne

Afin de déterminer la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire soumis à la présence d'une végétation arborescente vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne il est nécessaire d'évaluer huit critères fonctionnels (partie 2 chap. 1, Figure 23). Deux d'entre eux sont utilisés deux fois dans le modèle (C1, EI et C4, EI). Les critères « *Singularités du corps de digue* », « *Singularités de la fondation* » et « *Singularités à l'interface corps de digue – fondation* » sont évalués directement à dire d'expert. Ces trois critères correspondent à la possibilité que le tronçon de digue analysé soit pourvu d'un ouvrage traversant ou bien soit affecté par des terriers d'animaux fouisseurs. Les indicateurs d'état spécifiques à ces deux éléments (ouvrages traversant et présence d'animaux fouisseurs) n'ont été listés que partiellement et ne sont pas formalisés. Dans le cadre de cette thèse, nous n'avons pas développé ces indicateurs mais ces travaux pourront être engagés ultérieurement. Des indicateurs d'état spécifiques aux ouvrages traversant ont par ailleurs été identifiés mais non formalisés (Ferrer et al., 2015). Pour les autres critères, il est nécessaire d'identifier, formaliser et agréger les indicateurs pertinents. Il s'agira donc de développer 5 modèles : un par critère. La Figure 60 illustre ces huit critères fonctionnels et leur mode d'évaluation.

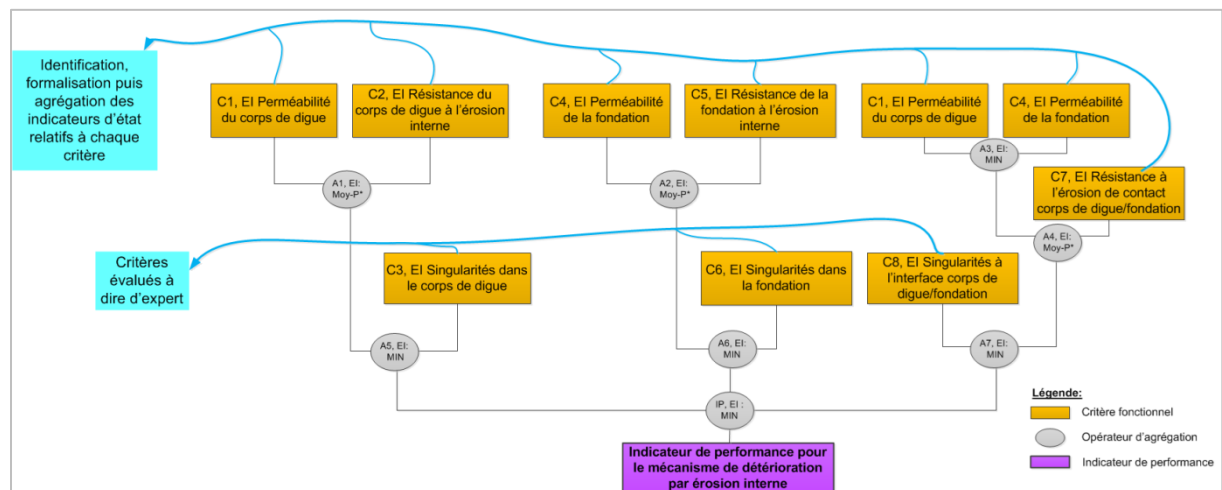


Figure 60. Critères fonctionnels nécessaires pour l'évaluation de l'indicateur de performance relatif au mécanisme de détérioration par érosion interne et méthodes associées pour leur évaluation

#### 1.1. Identification et formalisation des indicateurs d'état nécessaires à l'évaluation de chacun des critères fonctionnels

Selon la méthodologie décrite (partie 2, chap. 4, section 1), les indicateurs d'état nécessaires pour l'évaluation de chacun des cinq critères fonctionnels ont été identifiés à partir de la liste précédemment établie par Vuillet (2012) et après le recueil de l'avis du groupe d'expertise. Nous avons également

intégré les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente que nous avons identifiés et formalisés (partie 3, chap.2).

Le Tableau 23 présente ces résultats, soit les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de chacun des critères fonctionnels. Parmi les indicateurs d'état listés dans les travaux de Vuillet (2012) un certain nombre d'apports et de changements ont été réalisés :

- les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente sont ajoutés à la liste des indicateurs permettant l'évaluation du critère C1, EI. Par contre, l'indicateur « *Etanchéité de la protection amont* » est supprimé car nous ne considérons pas dans le cadre de cette thèse les digues fluviales étanchées par une protection amont ;
- pour l'évaluation du critère fonctionnel C2, EI, deux indicateurs présents dans la liste sont supprimés : « *Composition du remblai, sensibilité à l'érosion interne* » et « *Gradients critiques versus gradient de la crue* ». Un seul indicateur utilisant le même type d'informations est alors développé : « *Sensibilité du corps de digue à l'érosion interne pour la charge permanente de la crue de référence* » ;
- les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente sont ajoutés à la liste des indicateurs permettant l'évaluation du critère C4, EI. L'indicateur « *Etanchéité de la protection amont* » est également supprimé ;
- pour l'évaluation du critère fonctionnel C5, EI, deux indicateurs présents dans la liste sont supprimés : « *Composition de la fondation, sensibilité à l'érosion interne* » et « *Gradients critiques versus gradient de la crue* ». Un seul indicateur utilisant le même type d'informations est alors développé : « *Sensibilité à l'érosion interne de la fondation pour la charge permanente de la crue de référence* » ;
- pour l'évaluation du critère fonctionnel C7, EI, deux indicateurs présents dans la liste sont supprimés : « *Différence de granulométrie entre le corps de digue et la fondation* » et « *Gradients critiques versus gradient de la crue* ». Un seul indicateur utilisant le même type d'informations est alors développé : « *Sensibilité à l'érosion de contact à l'interface pour la charge permanente de la crue de référence* ».
- pour les critères fonctionnels C3, EI ; C6, EI et C8, EI relatifs aux singularités potentiellement présentes sur les différents composants (corps de digue, fondation et interface), nous enlevons l'indicateur « *Arbres/Racines* » présent dans la liste pour le remplacer par les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente. Dans les modèles que nous avons développés, ces indicateurs ne servent plus à l'évaluation des critères relatifs aux singularités mais aux critères relatifs à la perméabilité des composants. En effet, l'influence de la présence de la végétation arborescente de part, la croissance des systèmes racinaires puis de leur décomposition a un réel impact sur la perméabilité de l'ouvrage. Les critères C3, EI ; C6, EI et C8, EI restent notés à dire d'expert.


**Tableau 23. Indicateurs d'état relatifs aux différents critères fonctionnels nécessaires à l'évaluation de la performance d'une digue en remblai homogène vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne du fait de la présence de végétation arborescente**

Critères fonctionnels	Indicateurs d'état
C1, EI : Perméabilité du corps de digue	<b>IE1.1 : Fuites, indices de fuites (eau claire)</b> IE1.2 : Perméabilité du matériau IE1.3 : Géométrie de la digue IE1.4 : Densité des individus IE1.5 : Volume racinaire par individu IE1.6 : Type de structure racinaire des individus IE1.7 : Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu
C2, EI : Résistance du corps de digue à l'érosion interne	<b>IE2.1 : Fontis, cônes d'affaissement</b> <b>IE2.2 : Fuites chargées, indications de fuites chargées</b> IE2.3 : Sensibilité du corps de digue à l'érosion interne pour la charge permanente de la crue de référence IE2.4 : Sensibilité de la discontinuité pour la charge permanente de la crue de référence IE2.5 : Durée de la crue
C4, EI : Perméabilité de la fondation	<b>IE4.1 : Fuites ou indices de fuites (eau claire)</b> <b>IE4.2 : Perméabilité du matériau de la fondation</b> IE4.3 : Géométrie de l'horizon de la couche de fondation intéressant la digue IE4.4 : Densité des individus IE4.5 : Volume racinaire par individu IE4.6 : Type de structure racinaire par individu IE4.7 : Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu
C5, EI : Résistance de la fondation à l'érosion interne	<b>IE5.1 : Fontis</b> <b>IE5.2 : Fuites, résurgences, indices de fuites chargées</b> IE5.3 : Sensibilité à l'érosion interne de la fondation pour la charge permanente de la crue de référence IE5.4 : Sensibilité des hétérogénéités ou des discontinuités de la fondation pour la charge permanente de la crue de référence IE5.5 : Durée de la crue
C7, EI : Résistance à l'érosion de contact corps de digue / fondation	<b>IE7.1 : Fuites, résurgences, indices de fuites chargées</b> IE7.2 : Sensibilité à l'érosion de contact à l'interface pour la charge permanente de la crue de référence IE7.3 : Durée de la crue

Chacun de ces indicateurs d'état, qu'il soit spécifique à la végétation arborescente ou non, a été formalisé en utilisant la grille en six champs explicité dans la partie 2 (partie 2, chap. 2, Tableau 4). Pour certains d'entre eux, nous sommes repartis des grilles existant pour les barrages (Curt, 2008). L'indicateur d'état « *Densité des individus* » est présenté dans le Tableau 22. Le Tableau 24 donne l'exemple de l'indicateur d'état « *Géométrie du corps de digue* » relatif à l'évaluation du critère C1, EI « **Perméabilité du corps de digue** ».




**Tableau 24. Grille de formalisation pour l'indicateur d'état « Géométrie du corps de digue »**

Nom	IE1.3 – Géométrie du corps de digue
<i>Définition</i>	Les caractéristiques géométriques d'une digue sont définies par sa hauteur, sa largeur de base et sa largeur de crête. Il s'agit d'un rapport largeur de base et de crête/hauteur. Selon l'ILH (Sharp et al., 2013) une digue moyenne fait <b>environ 4 mètre en crête</b> .
<i>Mode opératoire</i>	La détermination de la géométrie de la digue est issue des éléments du dossier de conception-réalisation ou bien par défaut, de levés topographiques lors d'une visite.
<i>Echelle et références</i>	 10-8 : géométrie large 7-6 : géométrie moyenne 5-2 : géométrie étroite
<i>Caractéristique de lieu</i>	Le profil en travers du tronçon de digue homogène analysé
<i>Caractéristique de temps</i>	Une fois à la conception ou lors d'un besoin par levée topographique

Parmi ces indicateurs d'état, certains sont qualifiés d'**indicateurs d'état directs** (en gras sur le Tableau 23). Ces derniers permettent d'obtenir directement la note du critère fonctionnel auquel il se réfère. Par exemple, pour le critère fonctionnel C1, EI, l'indicateur d'état IE1.1 « *Fuites, indices de fuites (eau claire)* » est un indicateur d'état direct (Tableau 25).

**Tableau 25. Grille de formalisation de l'indicateur d'état direct « Fuites, indices de fuites – corps de digue »**

Nom	IE1.1 - Fuites (eau claire) ou indices de fuites (zones humides) – corps de digue
<i>Définition</i>	Les fuites d'eau peuvent être observées lors d'une inspection en crue ou post crue. Il est important d'identifier la position de la fuite sur le talus : bas de talus ou mi-hauteur, ainsi que le débit de fuite (grosse fuite, filet d'eau). De même, la position des indices de fuites et leurs étendus est à identifier. Cet indicateur est un indicateur direct qui permet de renseigner sur la perméabilité du corps de digue.
<i>Mode opératoire</i>	Cet indicateur est un indicateur issu de mesures visuelles.
<i>Echelle et références</i>	 10 : pas de fuites ou d'indices de fuites observés 5-4 : léger filet d'eau observé – zone humide restreinte 3-2 : moyenne fuite observée – zone humide moyenne 1-0 : grosse fuite et/ou très nombreuses petites fuites – zone humide étendue
<i>Caractéristique de lieu</i>	Talus coté zone protégée pour le tronçon de digue homogène analysé. Au niveau du corps de digue – bas de la zone 2, zone 3 ou haut de la zone 4
<i>Caractéristique de temps</i>	Cet indicateur est mesuré lors d'inspection en crue ou post crue

## 1.2. Agrégation des indicateurs d'état pour l'évaluation des critères fonctionnels

A la suite de l'identification et de la formalisation de l'ensemble des indicateurs d'état nécessaires à l'évaluation de chacun des critères fonctionnels, nous cherchons les structures d'agrégation adéquates permettant d'aboutir à cette évaluation. Hormis ceux liés aux singularités potentiellement présentes dans les différents composants de digues<sup>7</sup> (C3, EI ; C6, EI ; C8, EI – cf. Figure 60), des modèles d'agrégation pour l'évaluation de chacun des critères à partir des indicateurs d'état correspondant ont été décrits.

Nous présentons à titre d'exemples l'évaluation de C1, EI « *Perméabilité du corps de digue* » (Figure 61) et C2, EI « *Résistance du corps de digue à l'érosion interne* » (Figure 63). C1, EI est un critère considérant la végétation arborée contrairement à C2, EI. Une fois l'ensemble des critères évalués, leurs scores sont injectés dans le modèle de Vuillet (2012) (Figure 60) afin d'obtenir le score de l'indicateur de performance du tronçon analysé vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne. Les modèles décrits sont de type boîte blanche c'est-à-dire qu'ils explicitent les différents phénomènes de manière à mimer pas à pas le raisonnement expert.

### 1.2.1. Evaluation de C1, EI

Le modèle permettant l'obtention de la performance C1, EI est présenté sur la Figure 61. Ce critère est évalué directement à partir de la note de l'indicateur d'état direct IE1.1 « *Fuites ou indices de fuites (eau claire)* » si celle-ci est considérée comme « médiocre » à « inacceptable ». Si IE1.1 est évalué comme « bon à très bon », C1, EI est évalué par la structure d'agrégation produite par formalisation d'expertise (Figure 61).

Des règles d'agrégation pour IE1.2 à IE1.7 sont synthétisées sous la forme de tables de vérité expertes (Figure 62). Notre choix d'utilisation de plusieurs tables de vérité se justifie au regard du nombre d'indicateurs d'état à agréger pour l'évaluation de C1, EI. Les tables pour obtenir **la perméabilité intrinsèque du corps de digue** et une **estimation de la propension aux écoulements due à la présence de végétation** sont définies et une dernière table vise à évaluer C1, EI. Ainsi, nous évaluons d'une part la perméabilité intrinsèque du corps de digue sans considérer la présence de végétation arborescente. Parallèlement, nous évaluons la propension aux écoulements dus à la présence de végétation arborescente. Pour la propension aux écoulements, les indicateurs IE1.4, IE1.5, IE1.6 et IE1.7 sont agrégés selon une logique phénoménologique. Nous cherchons dans un premier temps à obtenir *le volume racinaire global* par la combinaison 1 d'IE1.4 et IE1.5. Puis nous agrégeons le résultat de cette première combinaison avec IE1.6 afin d'obtenir une *première caractérisation globale des systèmes racinaires* (combinaison 2) présent dans le corps de digue du tronçon analysé. Enfin, nous combinons ce résultat avec IE1.7, ce qui permet *l'estimation de la propension aux écoulements* (combinaison 3) dans le corps de digue affecté par la présence de végétation arborée. Cette évaluation de la *propension aux écoulements due à la présence de végétation arborescente* vient dégrader l'évaluation de la *perméabilité intrinsèque du corps de l'ouvrage* à l'aide de la table de vérité N°5 (Figure 61).

<sup>7</sup> Corps de digue, fondation et interface corps de digue-fondation

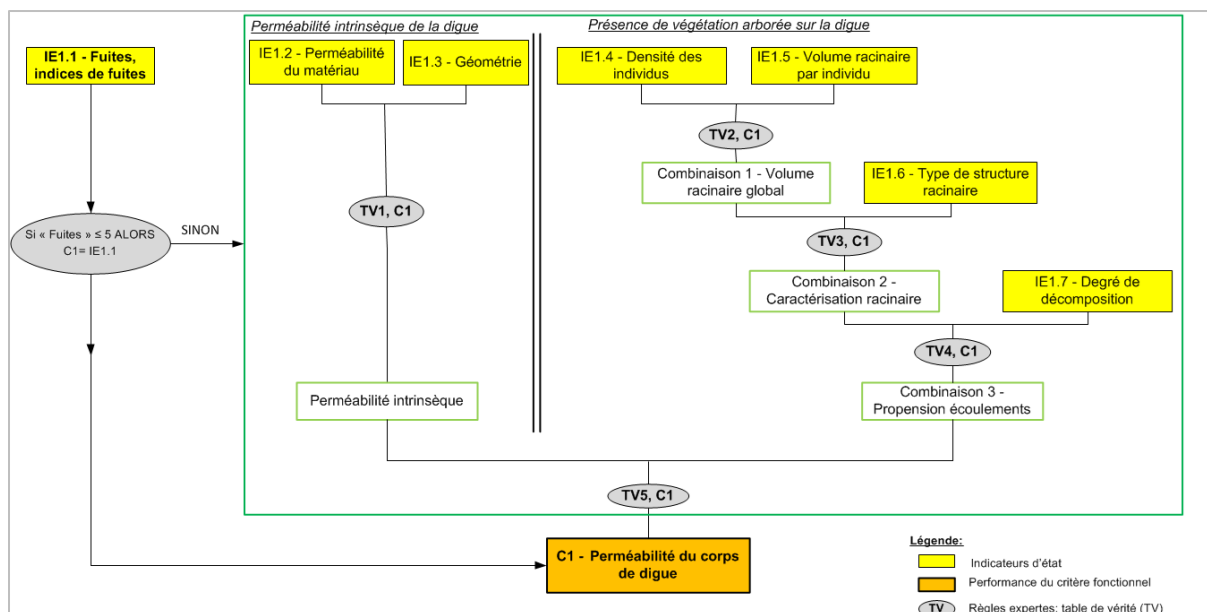


Figure 61. Diagramme d'agrégation des indicateurs d'état pour l'évaluation du critère fonctionnel C1, EI « Perméabilité du corps de digue »

La Figure 62 présente un exemple de table de vérité (TV1 permettant de combiner IE1.2 et IE1.3) ayant comme résultat, l'évaluation de la perméabilité intrinsèque de la digue. Les deux premières lignes de la table sont grisées car IE1.3 ne prend pas les valeurs [0 ; 1] dans les références qui ont été établies.

		IE2 Perm. du mat.												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
IE3 Géométrie	0													
	1													
	2		0	1	1	1	2	4	4	4	5	5	5	
	3		1	1	1	1	2	4	4	4	5	5	5	
	4		1	1	2	2	3	3	4	5	8	8	8	
	5		1	1	3	3	3	3	5	5	8	8	8	
	6		2	2	4	4	5	6	6	6	8	8	8	
	7		2	2	4	5	5	6	7	7	8	8	9	
	8		3	3	4	5	6	7	8	8	8	9	10	
	9		3	3	4	5	6	7	8	9	9	9	10	
	10		3	3	4	5	6	7	9	9	10	10	10	

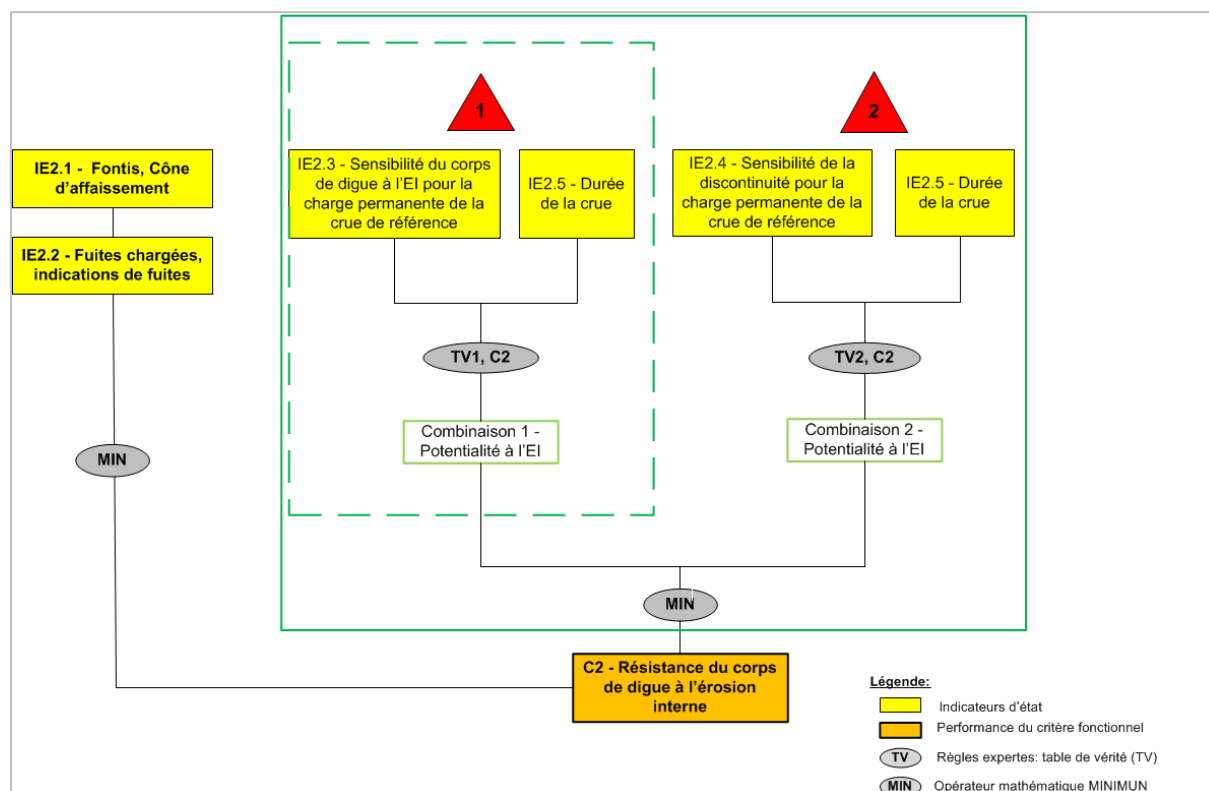
Figure 62. Table de vérité experte pour l'agrégation des indicateurs d'état IE1.2 et IE1.3 du critère fonctionnel C1, EI « Perméabilité du corps de digue »

### 1.2.2. Evaluation de C2, EI

Le modèle permettant l'évaluation de C2, EI « Résistance du corps de digue à l'érosion interne » est présenté sur la Figure 63. Ce critère peut être évalué directement à partir des notes des indicateurs d'état directs IE2.1 « Fontis, cône d'affaissement » et IE2.2 « Fuites chargées ou indices de fuites ». Si l'un ou l'autre au moins est actif (notes obtenues considérées comme allant de médiocre à inacceptable), alors l'évaluation de C2, EI correspondra à la note minimale entre ces deux indicateurs d'état. Si IE2.1 et IE2.2 sont évalués comme « bon à très bon » alors C2, EI est évalué par la structure d'agrégation développée par formalisation d'expertise (Figure 63).

Les indicateurs d'état nécessaires à l'évaluation de C2, EI sont agrégés à l'aide de règles de type SI...ALORS synthétisées sous la forme de table de vérité expertes. Deux cas se présentent pour l'évaluation de C2, EI :

- **Dans le cas n°1**, que l'on peut qualifier de courant, aucune discontinuité<sup>8</sup> (remblai – remblai) n'est présente sur le tronçon analysé : deux indicateurs sont nécessaires à l'évaluation de C2, EI : IE2.3 « *Sensibilité du corps de digue à l'érosion interne pour la charge permanente de la crue de référence* » et IE2.5 « *Durée de la crue* ». Ces deux indicateurs sont agrégés à l'aide de la table de vérité n°1 (TV1) pour obtenir la *potentialité d'érosion interne* du tronçon de digue évalué;
- **Dans le cas n°2**, une discontinuité remblai-remblai est présente au niveau du tronçon de digue, les indicateurs d'état IE2.4 « *Sensibilité de la discontinuité pour la charge permanente de la crue de référence* » et IE2.5 « *Durée de la crue* » sont évalués parallèlement aux indicateurs d'état IE2.3 et IE2.5 comme l'illustre la Figure 63. La combinaison 2 obtenue à l'aide de TV2, nous permet d'avoir la *potentialité d'érosion interne* mais au niveau de la discontinuité. Finalement, C2, EI est obtenu en retenant la note minimale (opérateur MIN) entre les deux combinaisons.



**Figure 63. Diagramme d'agrégation des indicateurs d'état pour l'évaluation du critère fonctionnel C2, EI « Résistance du corps de digue à l'érosion interne » - (EI : érosion interne, cas 1 = absence de discontinuité ; cas 2 = présence de discontinuité)**

Pour tous les modèles développés, une logique relevant d'un **processus phénoménologique**, comparable à celle présentée ci-dessus, a été suivie pour l'agrégation des indicateurs d'état.

<sup>8</sup> Sont traitées dans ce mémoire, les discontinuités remblai-remblai provenant des différentes étapes de construction de l'ouvrage (à différentes époques de la vie de l'ouvrage). Il peut également s'agir de zones de brèches qui ont été rebouchées. Nous ne traitons pas des discontinuités correspondant à une discontinuité remblai- structure « rigide » qui sont prises en compte dans le critère C3, EI « *Singularité du corps de digue* »

Les modèles développés permettent l'évaluation des critères fonctionnels qui sont la base du modèle d'évaluation de la performance des digues fluviales vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne développé par Vuillet (2012) (cf. Figure 60).

### *1.3. Validation : simulation sur cas test*

Comme explicité dans la partie 2 (partie 2, chap. 5, section 1), les formalisations des indicateurs d'état ainsi que les formalisations des agrégations pour l'évaluation de chaque critère fonctionnel ont été validées en plusieurs étapes.

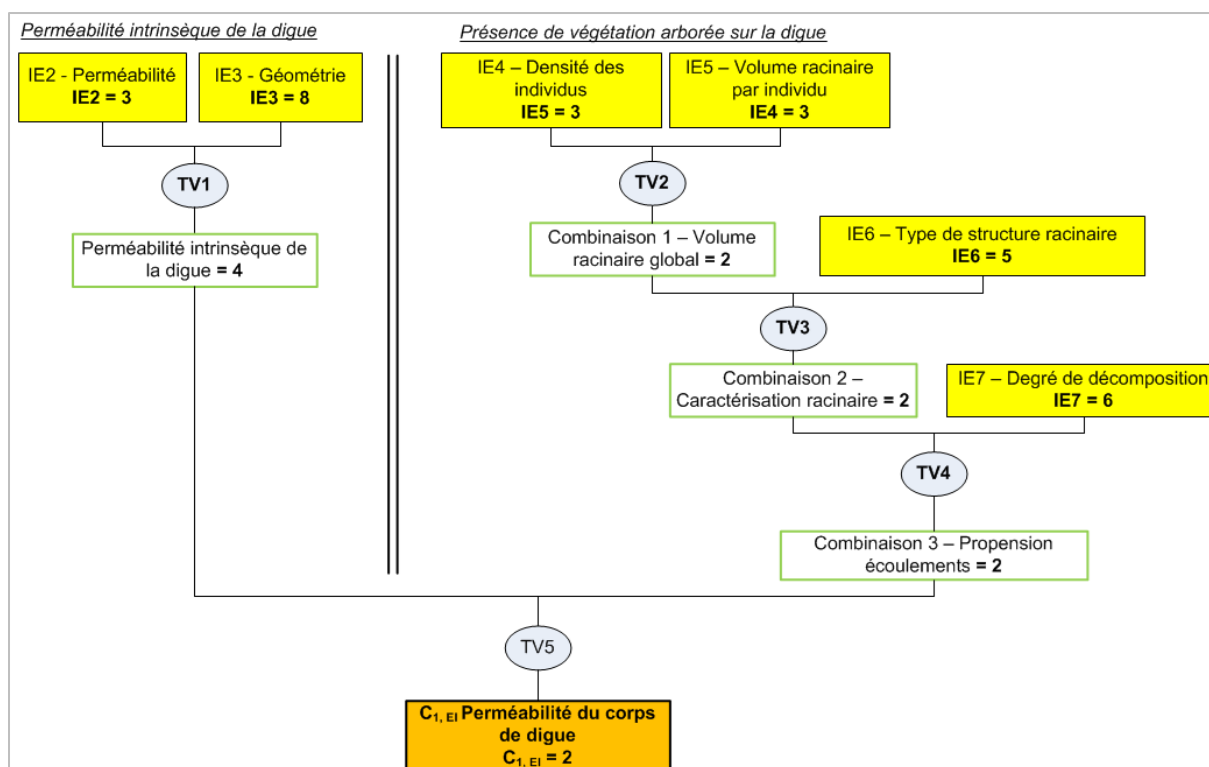
Dans un premier temps, plusieurs simulations sur des cas « tests » simplifiés ont été réalisées afin de valider au fur et à mesure les formalisations.

A titre d'exemple, nous présentons une simulation de l'évaluation de C1, EI effectuée lors d'une séance avec le groupe d'expertise. Cette étape permet de valider la cohérence des formalisations et des agrégations des indicateurs d'état pour l'évaluation de C1, EI sur des cas simplifiés.

Le descriptif suivant a été donné aux experts pour la validation des formalisations des indicateurs et des agrégations du modèle : *« aucune fuite ou indice de fuites n'est observé sur la digue, le groupe d'expertise s'attache donc à attribuer un score aux indicateurs IE1.2 à IE1.7 (Tableau 23). Le tronçon de digue analysé a une perméabilité considérée comme mauvaise. Le remblai est constitué de sols granulaires. Par contre sa géométrie est large. Plusieurs arbres, essentiellement des pins sylvestres et des mélèzes, sont présents sur le talus « côté eau » de la digue (la digue est située dans le prolongement de la berge), des arbres et des souches mortes sont également présents sur le talus côté zone protégée et son pied. D'après les observations visuelles, la densité des individus présents sur le talus « côté eau » est élevée. Nous sommes en présence de plusieurs arbres matures dont le diamètre au collet est > 30cm. Côté zone protégée, de nombreux individus (présence de 2 à 5 individus par 10 m<sup>2</sup>) ont été abattus il y a 4 ans. »*

A partir de ce descriptif, les experts ont évalué de manière consensuelle IE1.2 à IE1.7 de C1, EI (Tableau 23). Ils ont utilisés les grilles de formalisation pour noter chacun des indicateurs d'état et ont ainsi jugés de leurs cohérences. La Figure 64 présente le résultat. Le résultat obtenu et la validation de ce résultat par le groupe d'experts, permettent de vérifier la cohérence des formalisations et des agrégations des indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de C1, EI. En effet, les résultats produits par le modèle ont été fournis au groupe d'experts. Ils ont ainsi validé les agrégations par rapport à leur propre avis sur la performance du tronçon.

La formalisation de chacun des indicateurs et le choix pertinent des agrégations assurent la répétabilité et la reproductibilité de l'évaluation de C1, EI. Nous avons également effectué des tests en faisant noter les experts individuellement afin de s'assurer de la répétabilité des notations suite aux formalisations établies.



**Figure 64. Exemple de résultat de simulation pour l'évaluation du C1, EI « Perméabilité du corps de digue » par le groupe d'expertise**

Dans un second temps, une application sur dossier a été proposée individuellement au groupe d'experts. Il s'agit d'évaluer la performance du corps de la digue de Veynes (05), en rive droite du petit Buëch, vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne.

La notation de cet ouvrage a été réalisée sur quatre tronçons « homogènes » vis-à-vis des principaux indicateurs d'état. Ces tronçons sont les mêmes que ceux qui avait été sélectionnés dans le cadre de l'application du modèle de Vuillet (2012), ce qui nous permet de comparer les résultats obtenus dans ce travail avec ceux de nos modèles qui prennent en compte les indicateurs spécifiques à la végétation arborescente et où la notation est réalisée au niveau des indicateurs d'état.

La digue a une géométrie pouvant être qualifiée de large, le remblai est constitué de graves sableuses avec des éléments roulés. Les perméabilités sur l'ensemble des tronçons sont globalement fortes ( $k > 10^{-3}$  m/s). La végétation arborescente est présente majoritairement sur le parement côté rivière (haut de talus, talus et pied de talus amont). Cette végétation est constituée majoritairement par des peupliers et des frênes. Nous y rencontrons également des saules et divers arbustes. L'âge des arbres est globalement hétérogène (comprise entre 30 et 50 ans) et leur densité est faible à forte en fonction des profils. La Figure 65 permet d'illustrer le tronçon N°1 de la digue de Veynes.



**Figure 65.** Vue du tronçon n°1 du talus coté rivière soumis à la présence d'une végétation arborescente de la digue de protection contre les inondations de Veynes (05) (photo : Bambara G., 2012)

C1, EI et C2, EI sont évalués sur la base des notes établies par les experts pour chacun des indicateurs d'état. C3, EI est évalué à dire d'expert. Les performances de chaque critère seront ensuite agrégées pour l'obtention d'un indicateur de performance du corps de digue à l'aide du modèle de Vuillet (2012).

Nous illustrons en exemple l'évaluation de la performance du tronçon N°1 vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne. Le Tableau 26 présente les résultats obtenus pour chaque critère fonctionnel suite aux notations individuelles des indicateurs d'état par les trois experts de notre groupe et antérieurement dans le cadre du projet Digsure (Peyras et al., 2015).

**Tableau 26.** Résultats de l'évaluation de la performance des critères fonctionnels au tronçon N°1 par le groupe d'expertise et résultats obtenus au cours du projet Digsure (Vuillet, 2012) (C1, EI = perméabilité du corps de digue ; C2, EI = résistance à l'érosion interne du corps de digue ; C3, EI = Singularité du corps de digue)

Tronçon 1	C1, EI	C2, EI	C3, EI
Expert 1(2014)	1	9	10
Expert 2(2014)	1	10	10
Expert 3 (2014)	2	10	10
Projet Digsure (Vuillet, 2012)	5	7	8

Si nous comparons les résultats, nous remarquons que les notes varient fortement pour C1, EI : passage d'une performance médiocre (5) à inacceptable (1-2). Cette variation peut s'expliquer d'une part parce que les notations sont réalisées au niveau le plus bas du modèle hiérarchique (indicateurs d'état formalisés en 2014 alors que la notation était effectuée au niveau des critères en 2012) et d'autre part, par le fait que notre modèle prend en compte la présence de végétation arborescente dans le critère C1, EI. Or, au cours du projet Digsure, C1, EI était évalué seulement à partir de la *perméabilité intrinsèque du corps de digue*. La *perméabilité intrinsèque du corps de digue* obtenu à l'aide de notre modèle est évaluée comme mauvaise à médiocre (2 à 5) en fonction des experts qui ont noté les indicateurs IE1.2 et IE1.3 au lieu de noter directement C1, EI. L'écart de la note de l'indicateur d'état IE1.3 élicité par l'un des experts (par rapport aux deux autres) est supérieur à deux points sur l'échelle qualitative, ce qui entraîne un écart dans le résultat de la *perméabilité intrinsèque du corps de digue*



calculée par le modèle selon l'expert. La formalisation de l'indicateur IE1.3 a été revue en affinant les références précédemment établies.

La prise en compte de la végétation arborescente vient dégrader la perméabilité intrinsèque du corps de digue ce qui donne une note finale « inacceptable » (2 experts) à « mauvaise » (1 expert) selon les experts à C1, EI.

La performance de C2, EI est améliorée avec l'utilisation de notre modèle : passage d'une performance passable (7) à bonne (9-10). Cette différence peut s'expliquer par le fait que les notations sont réalisées au niveau des indicateurs d'état formalisés, ce qui permet de réduire les incertitudes épistémiques par rapport à une notation directe des critères fonctionnels par les utilisateurs du modèle.

Enfin, l'évaluation de C3, EI qui est réalisée à dire d'expert ne change pas de catégorie (Bon) mais s'améliore sensiblement (passage de 8 à 10 sur l'échelle numérique) sachant que la présence d'arbres n'est plus prise en compte dans ce critère mais dans C1, EI contrairement au modèle de Vuillet (2012).

Concernant l'évaluation de la performance du corps de digue vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne, les résultats obtenus par chaque expert et celui obtenu par le modèle de Vuillet (2012) sont similaires, soit une performance du corps de digue passable [6-7]. Cependant, notre modèle permet d'affiner les résultats vis-à-vis des performances de chacun des critères. Les gestionnaires ont donc la possibilité de cibler, de manière plus efficiente, les actions correctives à mettre en œuvre afin d'améliorer la performance de chacun de ces critères.

Enfin, la dernière étape de validation consiste à appliquer notre modèle d'évaluation sur un cas réel d'ouvrage avec déplacement des utilisateurs du modèle sur le terrain (ingénieurs experts et ingénieurs moins expérimentés). Un exemple d'application sur cas réel du modèle est présenté en partie 4 (partie 4, chap. 1.2).

## **2. Evaluation vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement**

Nous avons présenté en partie 2 (partie 2, chap.1, Figure 24), le modèle existant développé par Vuillet (2012) pour l'évaluation de la performance des digues de protection fluviales en remblai homogène vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement. Ce modèle nécessite l'évaluation de quatre critères fonctionnels : C1, AFF « **Résistance à l'affouillement de la protection du corps de digue côté cours d'eau** », C2, AFF « **Résistance à l'affouillement du corps de digue** », C3, AFF « **Résistance à l'affouillement de la protection de la fondation** » et C4, AFF « **Résistance à l'affouillement de la fondation** ». Quatre modèles d'agrégation d'indicateurs sont ainsi nécessaires. Nous présentons ci-dessous les résultats que nous avons obtenus concernant l'identification et l'agrégation des indicateurs d'état nécessaires pour l'évaluation de chacun de ces critères. Le modèle existant (Vuillet, 2012) nous permet ensuite d'obtenir un indicateur de performance relatif au tronçon évalué.

### **2.1. Identification et formalisation des indicateurs d'état**

L'identification et la formalisation de ces indicateurs ont été réalisées selon la méthodologie présentée en partie 2 (partie 2, chap.4, section 1).

Le Tableau 27 présente les résultats de l'identification des indicateurs d'état relatifs à chacun des critères fonctionnels pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire.



**Tableau 27. Indicateurs d'état des différents critères fonctionnels nécessaires à l'évaluation de la performance d'une digue en remblai homogène vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement du fait de la présence de végétation arborescente**

Critères fonctionnels	Indicateurs d'état
C1, AFF : Résistance à l'affouillement de la protection du corps de digue côté cour d'eau	IE1.1 : Etat de la protection du corps de digue IE1.2 : Densité des individus ayant traversé la protection du corps de digue côté cours d'eau IE1.3 : Port des individus IE1.4 : Sollicitation hydraulique par rapport à la résistance de la protection du corps de digue
C2, AFF : Résistance à l'affouillement du corps de digue	IE2.1 : Aspect de la population d'arbres IE2.2 : Résistance mécanique du corps de digue IE2.3 : Avancement de l'érosion du corps de digue IE2.4 : Sollicitation hydraulique par rapport à la résistance du corps de digue
C3, AFF : Résistance à l'affouillement de la protection de la fondation côté cours d'eau	IE3.1 : Contexte morphodynamique / tendances du cours d'eau (pour la prochaine crue morphogène) IE3.2 : Largueur du ségonnal à l'instant (t) IE3.3 : Etat de la protection de la fondation (Protection de la fondation par la protection de berge, protection de la fondation par la protection du pied de digue, présence de végétation arbustive et arborescente entre la berge et l'ouvrage hydraulique (sur le ségonnal), protection de la fondation par le ségonnal) IE3.4 : Sollicitation hydraulique par rapport à la résistance de la protection de la fondation
C4, AFF: Résistance à l'affouillement de la fondation	IE4.1 : Résistance mécanique de la fondation IE4.2 : Avancement de l'érosion de la fondation (hors protection) IE4.3 : Sollicitation hydraulique par rapport à la résistance de la fondation


Chacun de ces indicateurs d'état a été formalisé selon la grille explicitée dans la partie 2 (partie 2, chap. 2, section 2).

Pour IE1.1 et IE3.3 plusieurs grilles de formalisation ont été réalisées selon la nature de la protection. Les différents types de protection ont été déterminés sur la base du recueil de connaissances du groupe d'expertise et, le cas échéant à partir des grilles préexistantes pour les barrages (Curt, 2008). Nous identifions sept types de protection plus ou moins fréquemment choisis lors de la conception des ouvrages :

- Protection en enrochement sec ;
- Protection par un perré en pierres sèches ;
- Protection en enrochements jointoyé ou lié au béton ;
- Protection par un perré maçonné ;
- Protection par des dalles en béton ;
- Protection en béton bitumineux ;
- Protection en gabions ou matelas Reno.

Nous présentons à titre d'exemple la grille de formalisation de l'indicateur d'état IE1.1 « *Etat de la protection (Perré en pierre sèche)* » (Tableau 28).

**Tableau 28. Grille de formalisation de l'indicateur d'état IE1.1 « Etat de la protection (Perré en pierre sèche) »**

Nom	IE1.1 - Etat de la protection (Perré en pierre sèche)
<i>Définition</i>	On s'attache à relever les divers signes de dégradation de la protection: altération des pierres, pierres manquantes, ...
<i>Mode opératoire</i>	Appréciations visuelles
<i>Echelle et références</i>	 <p>10 : pierres toutes présentes et non altérées – absence d'herbe ou jeunes pousses  8-6 : présence d'herbe, jeunes pousses  5-3 : quelques pierres manquantes, altération des pierres  2-0 : beaucoup de pierres manquantes, forte altération des pierres</p>
<i>Caractéristique de lieu</i>	Protection de la digue « côté cours d'eau »
<i>Caractéristique de temps</i>	Lors d'un examen visuel

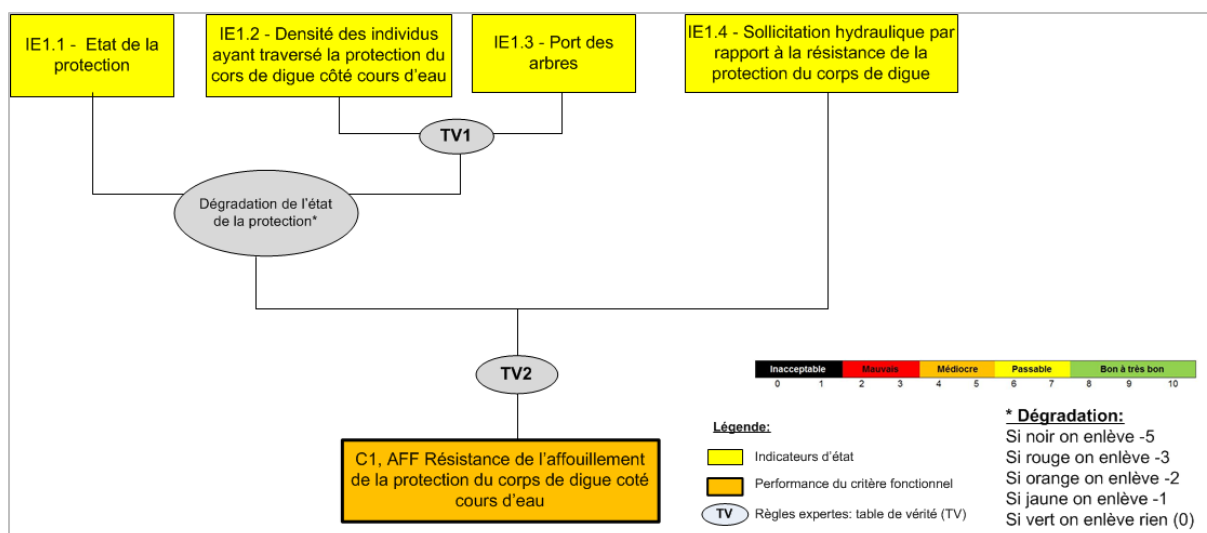
Nous précisons que nous ne prenons pas en compte, dans cet indicateur, l'état de dégradation due à la présence de végétation arborescente sur la protection. Elle sera prise en compte par les indicateurs d'état spécifiques que nous avons identifiés.

## 2.2. Agrégation des indicateurs d'état pour l'évaluation de chacun des critères fonctionnels

La formalisation des structures d'agrégation des indicateurs d'état pour l'évaluation de chacun des critères fonctionnels a été réalisée avec l'appui du groupe d'expertise. Une fois l'ensemble des critères évalués, leurs scores sont injectés dans le modèle d'évaluation de la performance des digues fluviales vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement développé par M. Vuillet (2012) (partie 2, chap. 1, Figure 24).

Nous présentons, ci-dessous, les structures d'agrégation élaborées pour les critères fonctionnels C1, AFF et C3, AFF. Nous détaillons la structure de ces modèles qui comportent des agrégations particulières, différentes de celles employées pour les modèles d'érosion interne mais en conservant toujours une logique phénoménologique.

C1, AFF est évalué à l'aide de quatre indicateurs d'état qui se combinent selon une logique phénoménologique : IE 1.2 est combiné avec IE2.3 à l'aide de règles expertes de type SI-ALORS synthétisées sous la forme d'une table de vérité que nous nommons TV1. Cette combinaison vient dégrader la note donnée par l'évaluateur de l'indicateur d'état IE 1.1 qui représente la valeur intrinsèque de la protection. Le résultat est combiné avec IE1.4. La Figure 66 illustre le diagramme d'agrégation. La dégradation est effectuée en fonction des jalons de couleurs représentés sur l'échelle de notation utilisée.



**Figure 66. Diagramme d'agrégation des indicateurs d'état pour l'évaluation du critère fonctionnel C1, AFF « Résistance à l'affouillement de la protection du corps de digue côté cours d'eau »**

Le critère fonctionnel C3, AFF est évalué en plusieurs étapes.

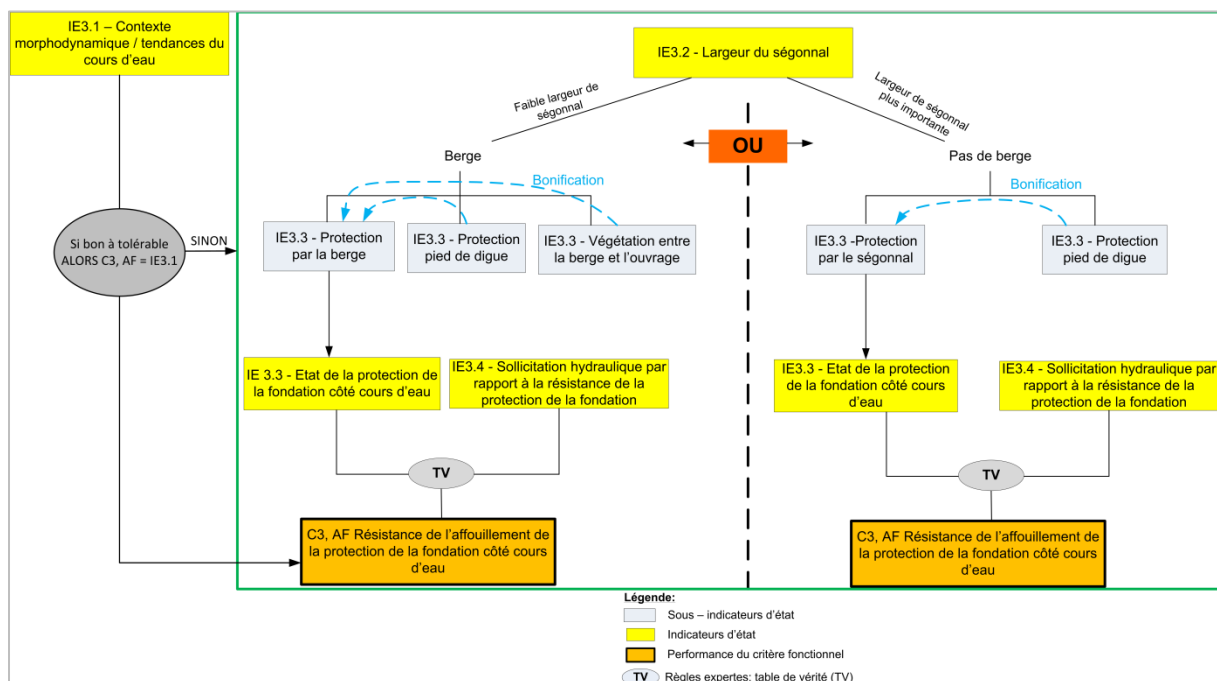
L'évaluateur s'attache en premier lieu à déterminer IE3.1. Cet indicateur peut être considéré comme un **indicateur d'état décisionnel**. S'il est évalué comme bon à passable : soit, selon les références établies lors de sa formalisation, lorsqu'il y a existence d'un ségonnal d'une largeur de dix fois à deux fois plus large que l'érosion susceptible de se produire lors de la crue morphogène, il donne sa note à C3, AFF. Par contre, si la note de IE3.1 est médiocre à inacceptable, les autres indicateurs d'état doivent être évalués puis agrégés pour obtenir l'évaluation de C3, AFF. Lors de ce type d'évaluation, nous nous plaçons dans un cadre de pronostic pour la prochaine crue morphogène. Ceci est afférent aux digues de protection qui ne sont pas en charge permanente. Les évaluations sont donc réalisées en projection de la prochaine crue.

La Figure 67 illustre le diagramme d'agrégation permettant d'obtenir l'évaluation de C3, AFF lorsque IE3.1 est évalué de comme médiocre à inacceptable. On évalue dans un premier temps l'indicateur d'état IE3.2. En fonction des références établies lors de la formalisation de cet indicateur, deux choix sont possibles :

- **Soit la largeur du ségonnal est faible**, dans ce cas nous considérons la berge comme la protection de la fondation de l'ouvrage hydraulique. IE 3.3 est évalué à l'aide des informations (ou sous indicateurs d'état) : « Protection de la fondation par la berge », « Protection de la fondation par le pied de digue », « Présence de végétation entre la berge et l'ouvrage ». La « Protection par la berge » constitue une information qui est bonifiée grâce à la présence potentielle d'une protection du pied de digue ou à la présence de végétation arbustive et / ou arborescente entre la berge et l'ouvrage qui permet de ralentir le courant hydraulique<sup>9</sup>. La « Protection de la fondation par la berge » permet alors d'obtenir la note de IE3.3 ;
- **Soit la largeur du ségonnal est plus importante**, nous considérons alors que l'IE3.3 est assuré par le ségonnal lui-même. Les sous-indicateurs permettant l'évaluation de cet indicateur sont : « Protection de la fondation par le ségonnal » et « Protection de la fondation par le pied de digue ». La présence d'une protection en pied de digue permet de bonifier la note du sous-indicateur « Protection de la fondation par le ségonnal » qui donnera ensuite la note à IE3.3.

<sup>9</sup> Ici, la présence de végétation entre la berge et l'ouvrage est considérée comme bénéfique tant qu'elle est située « hors » de l'ouvrage.

IE3.3 est combiné avec IE3.4 à l'aide d'une table de vérité experte afin d'obtenir l'évaluation de C3, AFF.



**Figure 67. Diagramme d'agrégation des indicateurs d'état pour l'évaluation du critère fonctionnel C3, AFF « Résistance à l'affouillement de la protection de la fondation côté cours d'eau »**

### 2.3. Validation

Le modèle d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai à charge temporaire vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement du fait de la présence de végétation arborescente a été construit en fin de thèse, en conséquent, les simulations sur cas test n'ont pas pu être réalisées. Lors des applications sur cas réels présentées dans la partie 4 (partie 4, chap. 1, section 1.3) de ce mémoire, les évaluateurs ont cependant pu noter les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de chacun des critères fonctionnels. Ces indicateurs venaient d'être formalisés très récemment avec l'appui du groupe d'expertise.

Les formalisations et les structures d'agrégation des indicateurs d'état permettant l'évaluation de chacun des critères fonctionnels ont été modifiées, complétées et / ou affinées à la suite de ces applications de terrain lors d'une séance de travail spéciale avec le groupe d'expertise. D'autres applications sont toutefois nécessaires pour valider définitivement ce modèle.

### 3. Synthèse

Les améliorations et apports de ces travaux de thèse ont porté sur différents points :

- La formalisation des différents indicateurs d'état. Au total nous avons formalisé 27 indicateurs pour l'évaluation de la performance vis-à-vis de l'érosion interne et 15 indicateurs pour l'évaluation de la performance vis-à-vis de l'affouillement ;
- Le développement de modèles d'agrégation des indicateurs pour l'évaluation de chacun des critères fonctionnels. Au total 5 modèles relatifs au mécanisme de détérioration par érosion interne ont été développés et 4 modèles pour l'affouillement.

Les modèles liés à l'érosion interne disposent en moyenne de 5 indicateurs d'état pour l'évaluation d'un critère (entre 7 et 3 indicateurs d'état). Pour l'affouillement, les modèles disposent en moyenne de 4 indicateurs (entre 4 et 3) pour l'évaluation d'un critère.

Différentes formes d'agrégation des indicateurs d'état ont été utilisé au sein des modèles : des règles expertes SI...ALORS résumés sous la forme de table de vérité, l'opérateur MIN et un système de dégradation de la note obtenue vis-à-vis d'un indicateur en fonction de la note d'un autre indicateur.

Les modèles construits sont valables pour les digues de protection fluviale en remblai homogène. Nous pourrions envisager en perspectives de ces travaux de développer des modèles pour d'autres types de digue comme par exemple les « digues zonés ». Pour ce type d'ouvrage, les modèles relatifs au mécanisme de détérioration par érosion interne devront être sensiblement modifiés notamment vis-à-vis des indicateurs relatifs à la perméabilité intrinsèque du corps de digue. Les indicateurs spécifiques à la végétation arborescente permettant d'évaluer la propension aux écoulements au sein de l'ouvrage ne changeraient pas. Les modèles relatifs à l'évaluation de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement ne changeraient que très peu. Il semble donc assez facile de transposer les modèles construits à d'autres types de digue. Une rigueur dans la vérification de l'ensemble des formalisations sera néanmoins nécessaire et des indicateurs spécifiques au type d'ouvrage donné seront à identifier et formaliser.

Les validations réalisées sur des cas tests puis des cas réels (partie 4, chap.1) permettent de vérifier la cohérence des formalisations de chaque indicateur puis la cohérence des agrégations. Le but recherché étant de mimer une évaluation réalisé par un expert, nous nous appuyons donc sur les avis et les connaissances du groupe de trois experts du domaine avec lesquels nous travaillons pour construire des modèles robustes.

## ***Chapitre 4. Evaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge permanente vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne en présence de végétation arborescente***

Les modèles développés dans la thèse pour l'évaluation du remblai des ouvrages hydrauliques à charge permanente (barrages et digues de canaux) et de leur fondation sont présentés dans ce chapitre. Dans un premier temps, nous explicitons la logique d'intégration des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente que nous avons développés pour améliorer les modèles existants. Nous présentons ensuite les adaptations qui ont été apportées aux modèles existants. Ces adaptations passent notamment par le développement d'une approche modulaire qui permet de disposer d'un modèle pour les différents types d'ouvrages hydrauliques en remblai qu'il est possible de rencontrer.

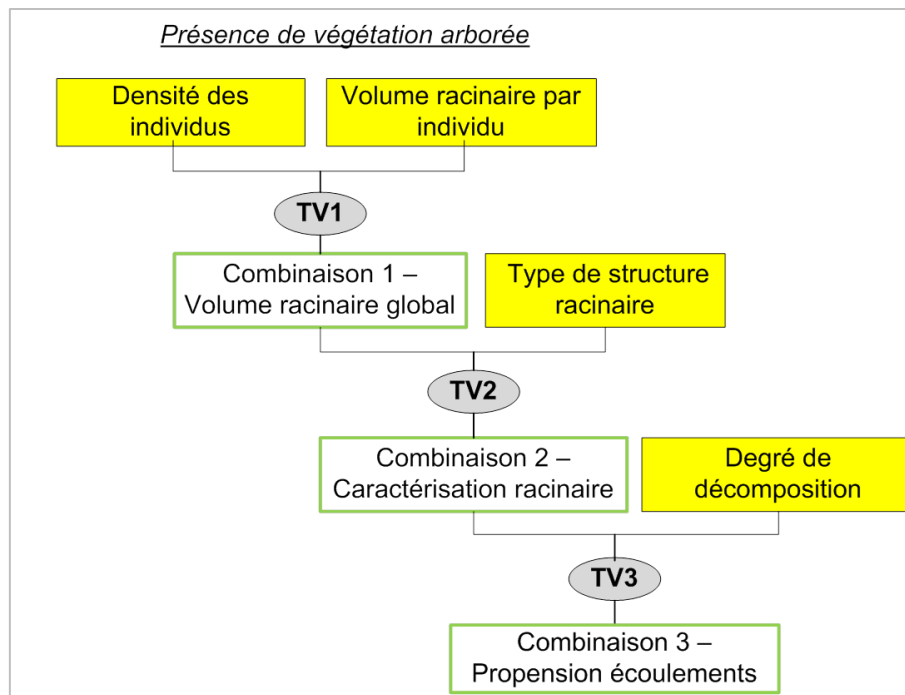
### ***1. Intégration des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente***

Lors de la phase d'identification et de formalisation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente, cinq indicateurs ont été identifiés comme nécessaires à l'évaluation de la *performance des fonctions d'étanchéité et de drainage* :

- *Densité des individus ;*
- *Volume racinaire par individu ;*
- *Type de structure racinaire par individu ;*
- *Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu ;*
- *Etat visuel de l'environnement à l'exutoire du tapis drainant (si barrage équipé de drains).*

Comme mis en évidence lors de l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) (partie 3, chap. 2, section 1), les indicateurs d'état: « *Densité des individus* », « *Volume racinaire par individu* », « *Type de structure racinaire par individu* », « *Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu* », ont été identifiés comme étant les indicateurs de causes ou d'effets relatifs à la dégradation ou à la défaillance de la fonction de l'ouvrage hydraulique « limiter les flux hydrauliques ». Ainsi, ces indicateurs d'état se doivent d'être intégrés dans le modèle développé par Curt (2008) pour l'évaluation de la performance de la fonction d'« *Etanchéité* ».

La Figure 68 présente la logique phénoménologique d'agrégation de ces indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente pour l'évaluation de la performance de la fonction d'« *étanchéité* ». La « *Densité des individus* » est combinée avec le « *Volume racinaire par individu* » à l'aide de règles expertes de type SI...ALORS synthétisées sous la forme d'une table de vérité qui permet d'obtenir le *Volume racinaire global* au droit du profil analysé. Cette première combinaison est agrégée avec le « *Type de structure racinaire par individu* », ce qui nous donne une *Caractérisation racinaire globale*. Enfin, nous combinons ce résultat avec le « *Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu* », ce qui nous permet d'obtenir la *Propension aux écoulements* du fait de la présence de végétation arborescente sur le profil analysé.



**Figure 68. Logique phénoménologique d'agrégation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente pour l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité**

L'indicateur d'état « *Etat visuel de l'environnement à l'exutoire du tapis drainant* » a été identifié à l'aide de l'AMDE comme étant un indicateur d'état relatif à l'évaluation de la fonction de « *Drainage* ». Il remplace l'indicateur d'état « *Présence de végétation* » qui était relatif à l'évaluation de la performance de cette fonction dans le modèle de Curt (2008).

## **2. Modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge permanente**

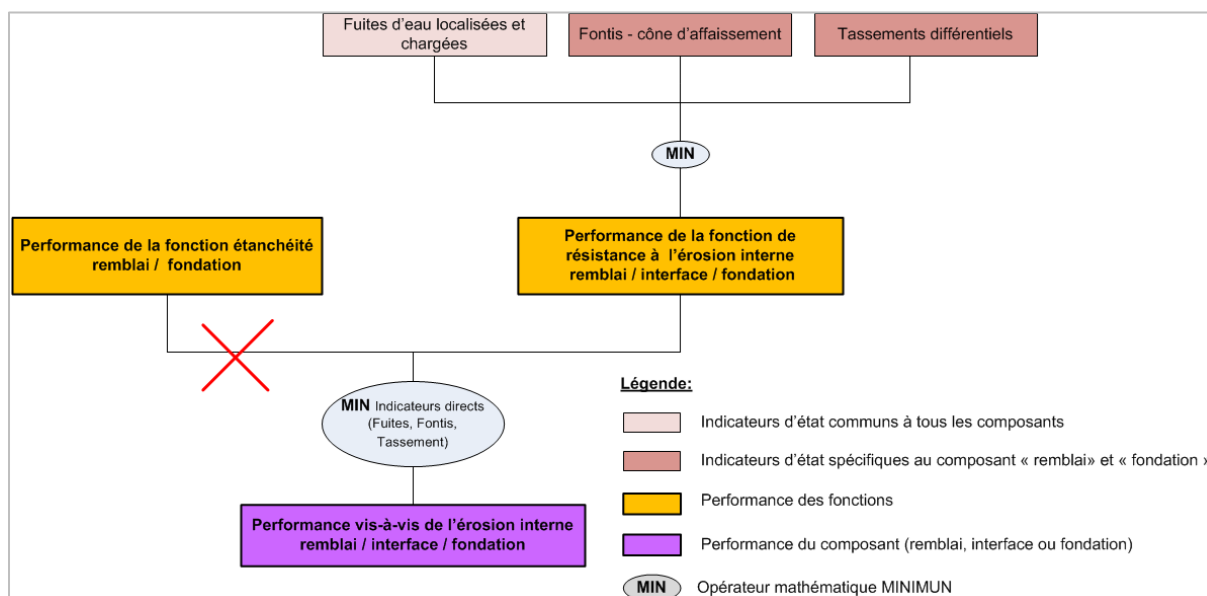
Les modèles d'évaluation de la performance des barrages vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne développés par Curt (2008) (partie 2, chap.1, section 1.2) s'adressent à des barrages en remblai drainés et équipés de dispositifs d'auscultation. Ces barrages sont généralement bien entretenus donc avec une présence végétale très limitée. Ces modèles reposent ainsi sur un certain nombre d'indicateurs auscultés. Or, les barrages en remblai soumis à la présence de végétation arborescente sont souvent des petits barrages ne possédant pas forcément de système de drainage ou de dispositifs d'auscultation : les modèles de Curt doivent alors être modifiés afin de tenir compte de ces spécificités d'équipement et les indicateurs de végétation doivent être introduits.

Nous présentons ci-dessous les adaptations réalisées pour l'évaluation des barrages de différents types (barrages avec des types d'étanchéité différents, présence ou absence de système de drainage, présence ou absence d'instruments d'auscultation) et soumis à la présence de végétation arborescente. Nous donnons en premier lieu le modèle d'évaluation utilisé dans le cas où un indicateur d'état direct relatif à la **fonction de « résistance à l'érosion interne »** est activé. Nous présentons ensuite un arbre de décision qui a été élaboré pour choisir les différents modules utiles pour l'évaluation de la performance d'un ouvrage hydraulique à charge permanente donné. Enfin, nous illustrons à titre d'exemple les modèles d'évaluation de la performance des barrages en remblai homogène non équipés de drains, ni d'instruments d'auscultation.

Lors de l'évaluation de la performance d'un ouvrage hydraulique à charge permanente vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne, l'utilisateur choisit un profil représentatif vis-à-vis de la végétation arborescente et, le cas échéant, d'autres profils a priori plus défavorables vis-à-vis de la

densité de végétation ou présentant un point singulier (géométrie plus défavorable, ouvrage traversant).

Dans le cas où les indicateurs d'état directs de la fonction de « *Résistance à l'érosion interne* » sont activés (« *Fuites d'eau localisées et chargées* » ; « *Fontis – cône d'affaissement* » ; « *Tassements différentiels* »), l'évaluation de chacun des composants (remblai, fondation, interface remblai-fondation) est réalisée à l'aide du modèle présenté en Figure 69.



**Figure 69. Modèle d'évaluation de la performance du remblai, de la fondation ou de l'interface d'un barrage en remblai si l'un des indicateurs d'état directs est activé**

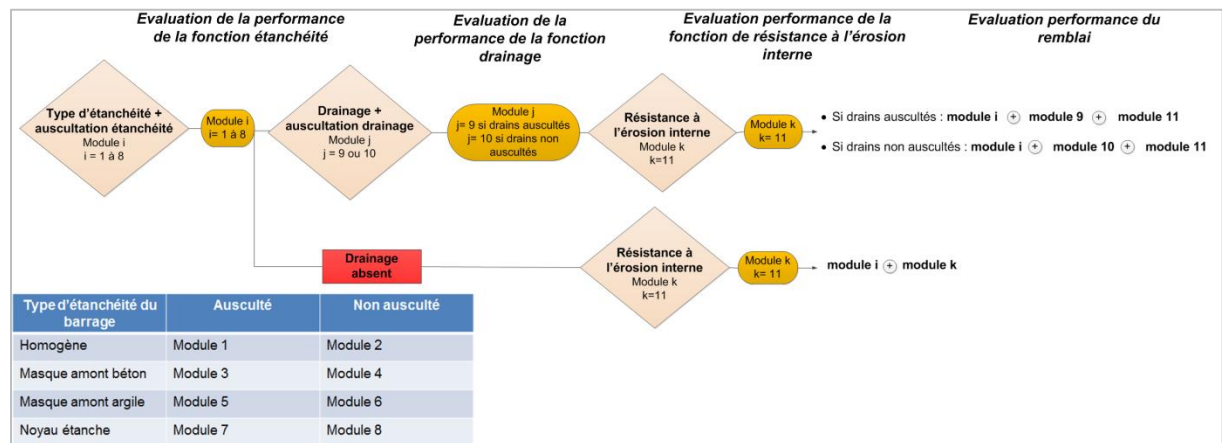
Dans le cas où aucun indicateur d'état direct relatif à l'évaluation de la performance de la fonction de « *Résistance à l'érosion interne* » n'est activé, nous utilisons les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance des fonctions de « *Étanchéité* », de « *Drainage* » et de « *Résistance à l'érosion interne* ». Selon le type d'ouvrage hydraulique à charge permanente qui doit être évalué, nous mettons en œuvre l'approche modulaire que nous avons développée. Dans notre étude, nous avons étudié quatre types :

- Les barrages en remblai homogène ;
- Les barrages avec masque d'étanchéité amont en béton ;
- Les barrages avec masque d'étanchéité amont en argile ;
- Les barrages zonés (noyau étanche).

Nous développons au total 31 modules dont 11 modules pour l'évaluation de la performance du remblai, 11 modules pour la fondation et 9 modules pour l'interface remblai-fondation. Par exemple, pour l'évaluation du remblai, nous disposons de 4 modules d'étanchéité du remblai sans auscultation (un par type d'étanchéité soit remblai homogène, masque en argile...), 4 modules d'étanchéité du remblai avec auscultation, 2 modules de drainage (si celui-ci est drainé) : l'un pour le cas où il n'y a pas d'auscultation des drains, l'autre pour le cas où il y a des instruments d'auscultation. Enfin, 1 module pour la résistance du remblai vis-à-vis de l'érosion interne (Figure 70). Les modules d'étanchéité et de drainage prennent en compte l'aspect végétation. La composante *Présence de végétation arborée sur le remblai* est commune à tous les modules 1 à 8. On utilise le module qui correspond au barrage à évaluer selon un arbre de décision. Seule la composante « **Perméabilité intrinsèque du remblai** » varie lorsque l'on passe d'un type d'étanchéité à l'autre, les autres indicateurs et les règles d'agrégation sont conservés.



La Figure 70 présente l'arbre de décision correspondant à l'évaluation du composant remblai.

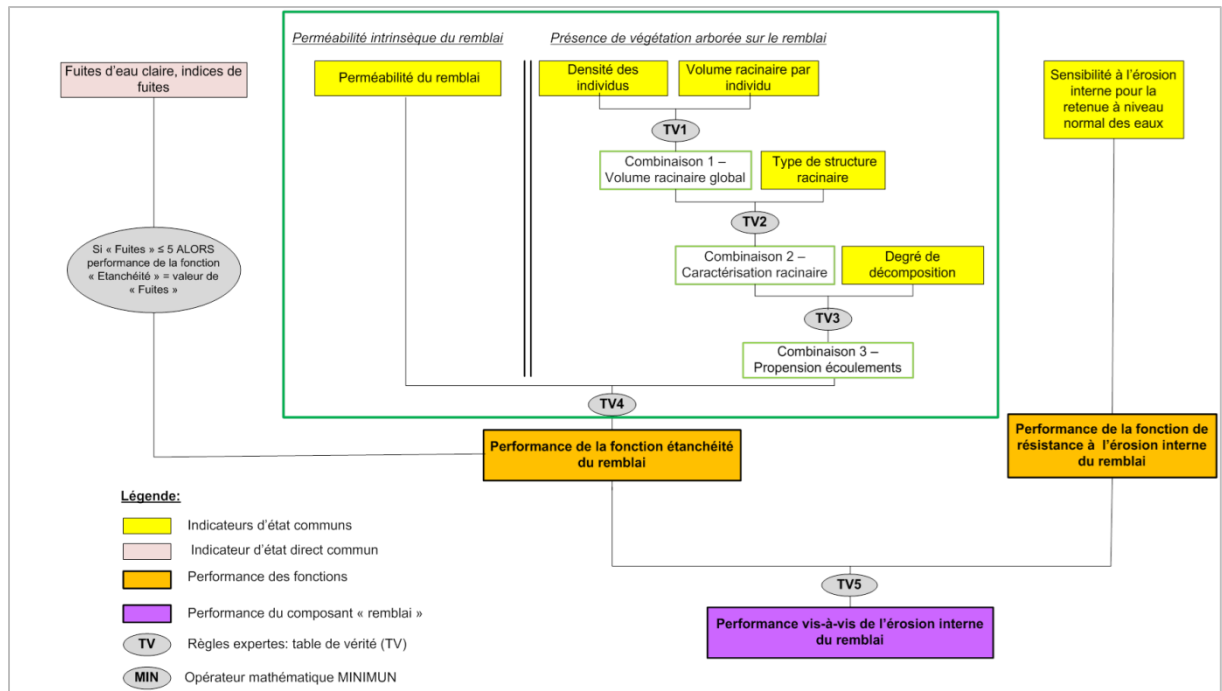


**Figure 70.** Représentation des différents modules nécessaires à l'évaluation de la performance du remblai vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne selon le type de barrage analysé

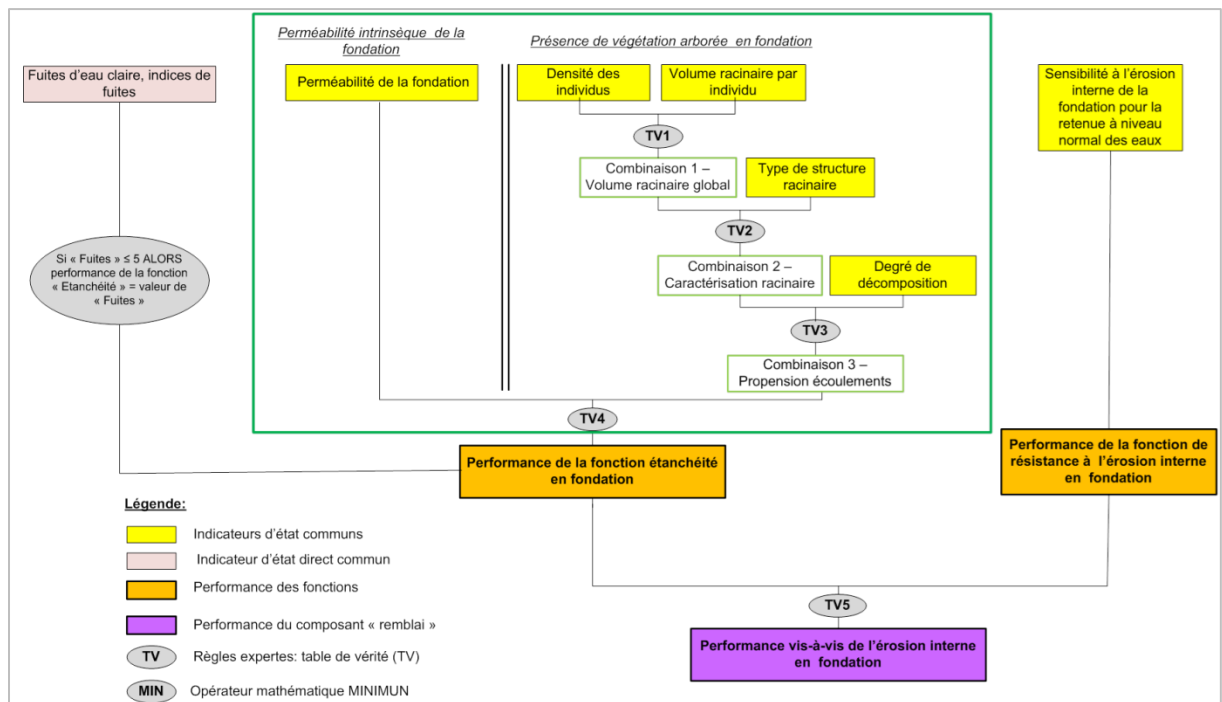
La modélisation par combinaison de modules est présentée sur la Figure 71 pour un barrage homogène, non drainé et non équipé d'instruments d'auscultation (module 1 combiné au module 11). Les paragraphes ci-dessous explicitent ce modèle.

L'évaluation de la performance de la fonction « *Etanchéité* » du remblai est directement obtenue à l'aide de l'indicateur d'état direct « *Fuites ou indices de fuites d'eau claire* » si ce dernier est activé (note inférieure ou égale à 5). Dans le cas contraire, elle implique les indicateurs d'état relatifs à la *perméabilité intrinsèque du remblai* et ceux spécifiques à la *présence de végétation arborescente*. Les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente sont agrégés selon la logique phénoménologique présentée ci-dessus. On évalue parallèlement la performance de la fonction de « *Résistance à l'érosion interne* » du remblai grâce à l'indicateur d'état « *Sensibilité à l'érosion interne pour la retenue à niveau normal des eaux* ». Au final, on combine les valeurs des performances des fonctions d' « *Etanchéité* » et de « *Résistance à l'érosion interne* ».

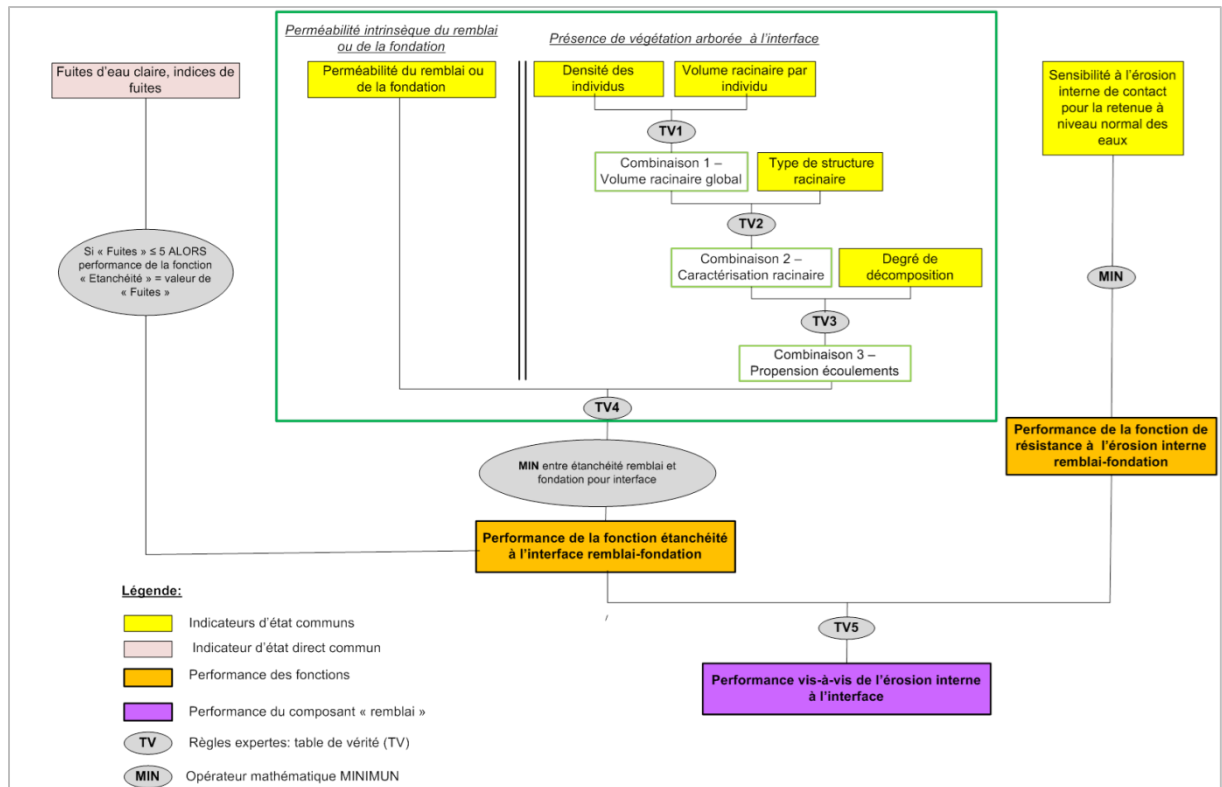
Les modèles d'évaluation de la performance des autres composants du barrage (fondation et interface remblai-fondation) suivent la même logique. Ils sont illustrés sur la Figure 72 et la Figure 73. L'évaluation de la performance de la fonction « *Etanchéité* » de la fondation suit la même logique que pour l'évaluation de la fonction étanchéité du remblai (Figure 72). La performance de la fonction *Etanchéité* de l'interface remblai-fondation est obtenue en utilisant l'opérateur mathématique MIN entre la performance de la fonction « *Etanchéité* » du remblai et la performance de la fonction *Etanchéité* de la fondation. Nous retenons ainsi la note la plus défavorable en combinant la performance de ces deux fonctions « *Etanchéité* » (Figure 73).



**Figure 71. Modèle d'évaluation de la performance du remblai d'un barrage en remblai homogène vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne du fait de la présence de végétation arborescente (cas d'un barrage non équipé de drains ni d'instruments d'auscultation)**



**Figure 72. Modèle d'évaluation de la performance de la fondation d'un barrage en remblai homogène vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne du fait de la présence de végétation arborescente**



**Figure 73. Modèle d'évaluation de la performance de l'interface remblai-fondation d'un barrage en remblai homogène vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne du fait de la présence de végétation arborescente**

### 3. Validation

Pour la phase de validation des formalisations des indicateurs d'état et des structures d'agrégation pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge permanente vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne du fait de la présence de végétation arborescente, nous avons réalisé **au total sept applications sur des ouvrages répartis dans la zone transfrontalière franco italienne.**

Nous présentons les résultats de ces applications dans la partie 4 (partie 4, chap. 2) de ce mémoire.

## Chapitre 5. Synthèse

Les principaux résultats obtenus et présentés dans ce mémoire sont :

- le développement de mesures indirectes sur la base de méthodes qualitatives et quantitatives permettant de donner des tendances sur la vitesse de décomposition des racines ligneuses en fonction de l'espèce, du diamètre et de l'implantation géographique de la végétation arborescente évalué. Ces tendances ont permis de renseigner l'indicateur « *Degré de décomposition de la souche ou des racines d'un individu* ». Une importante base de données, rassemblant notamment l'empreinte spectrale acquise au spectromètre proche infrarouge (SPIR) de chaque échantillon, a été constituée à partir de deux dispositifs expérimentaux. Les traitements effectués permettent d'une part de vérifier qu'il est possible de discriminer entre eux, les différents stades de décomposition, les différentes espèces et les différents diamètres. D'autre part, les modèles de régression PLS-DA développés permettent de prédire avec de bonnes performances le stade de décomposition et l'espèce auquel appartient un échantillon inconnu même après 6 ans de décomposition.
- l'identification et la formalisation des indicateurs d'état nécessaires à l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques (à charge temporaire ou permanente) soumis à la présence de végétation arborescente vis-à-vis des mécanismes de détérioration considéré (érosion interne et / ou affouillement) ;
- la construction des structures d'agrégation pour les différents modèles d'évaluation. Différentes méthodes d'agrégation ont été utilisées afin de combiner les indicateurs : des règles expertes de type SI...ALORS synthétisées sous la forme de tables de vérité, des notes dégradées, l'opérateur MIN. Les indicateurs spécifiques à la végétation arborescente ainsi que leur combinaison permettent globalement de dégrader la performance « intrinsèque » de l'ouvrage ;
- le développement de modèles spécifiques en fonction du type d'ouvrages hydrauliques à charge permanente considéré et ce, à l'aide d'une approche modulaire. Différents modules peuvent être facilement combinés afin de s'adapter au type d'ouvrage que l'on cherche à évaluer (barrage avec différents types d'étanchéité, drainé ou non, ausculté ou non) ;
- les validations des formalisations et agrégations des modèles construits au travers de cas test et d'applications de terrain.

Les modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente ont été développés pour les trois composants : corps de l'ouvrage (remblai), fondation et interface remblai-fondation.



# Partie 4

# Applications des modèles développés sur des cas réels d'ouvrages hydrauliques

*Chapitre 1. Utilisation des modèles sur des digues de protection fluviales*

*Chapitre 2. Utilisation des modèles sur des barrages en remblai*

*Chapitre 3. Synthèse*



La partie 4 de ce mémoire de thèse présente les applications de terrain qui ont été effectuées. L'utilisation des modèles d'évaluation de la performance pour les deux types d'ouvrages de génie civil étudiés permet de calibrer et valider les formalisations et agrégations des indicateurs d'état. Le premier chapitre présente l'utilisation des modèles développés sur des ouvrages hydrauliques à charge temporaire. Le second chapitre illustre les applications relatives aux ouvrages à charge permanente. Enfin une synthèse conclut cette partie.

## ***Chapitre 1. Utilisation des modèles sur des digues de protection fluviales***

Les modèles développés pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire, ont fait l'objet de trois applications au cours de ces travaux de thèse. Ces applications se sont déroulées sur les digues du Petit Rhône (13) gérées par le SYMADREM (Syndicat Mixte interrégional d'Aménagement des Dignes du Rhône Et de la Mer). Nous disposons pour ces ouvrages d'un ensemble de données récentes (Terrasol and Hydratec, 2010) issues des études réalisées dans l'optique du renforcement et du décorsetage limité des digues. Un dossier synthétique a été élaboré et fourni aux ingénieurs sur le terrain.

Pour chacune de ces trois applications, un profil représentatif d'un tronçon homogène de digue a été choisi en fonction des informations disponibles (dossier de l'ouvrage, essais géotechniques réalisés sur ou à proximité du tronçon, présence d'arbres). Les tronçons évalués sont :

- le tronçon rive droite, secteur du Mas Marignan ;
- le tronçon rive gauche, secteur du Mas de Cazeneuve ;
- le tronçon rive gauche, secteur du Bois de Beaumont.

Chacun de ces tronçons a été évalué vis-à-vis des deux mécanismes de détérioration : l'érosion interne et l'affouillement.

Les indicateurs d'état pour l'évaluation de la performance de chacun de ces tronçons ont été notés par huit ingénieurs ayant des niveaux d'expérience différents :

- trois ingénieurs experts qui constituent notamment le comité d'expertise avec lequel nous avons développé les modèles d'évaluation ;
- deux ingénieurs confirmés dans le domaine des systèmes experts pour l'évaluation de la performance des ouvrages ;
- un ingénieur débutant et deux ingénieurs stagiaires.

La diversité des niveaux d'expérience des ingénieurs mobilisés nous permet de vérifier que les formalisations des indicateurs d'état établies sont correctes, c'est-à-dire que leur utilisation est reproductible par différents utilisateurs. Le cas échéant, nous veillerons à améliorer la formalisation de ces indicateurs d'état. Les futurs outils basés sur les modèles développés sont destinés aux gestionnaires d'ouvrages et bureaux d'études chargés de l'établissement de diagnostics dans le cadre d'une étude de danger par exemple.

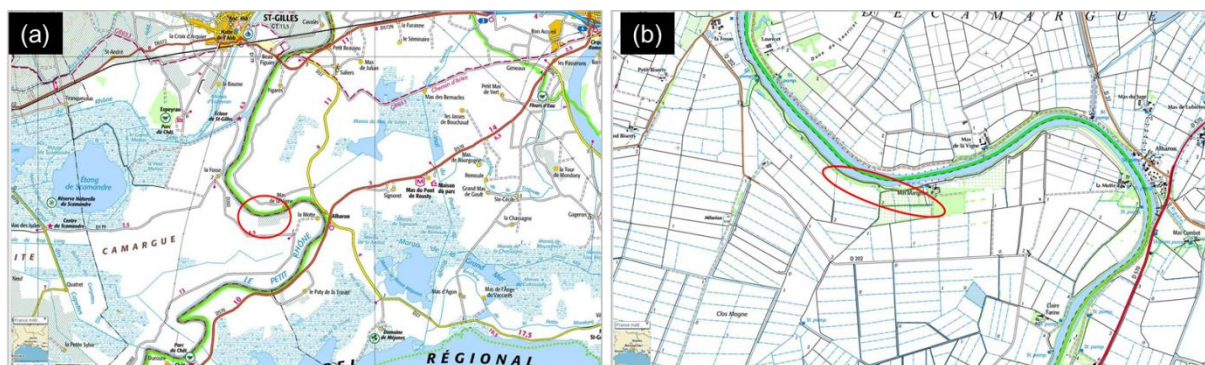
Nous présentons ci-dessous les résultats de l'application portant sur l'évaluation de la performance du tronçon, secteur Marignan vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne et affouillement. Un dernier point est consacré à une synthèse et discussion des résultats obtenus sur les trois sites.



## 1. Evaluation de la performance du tronçon, secteur Marignan

### 1.1. Description du tronçon

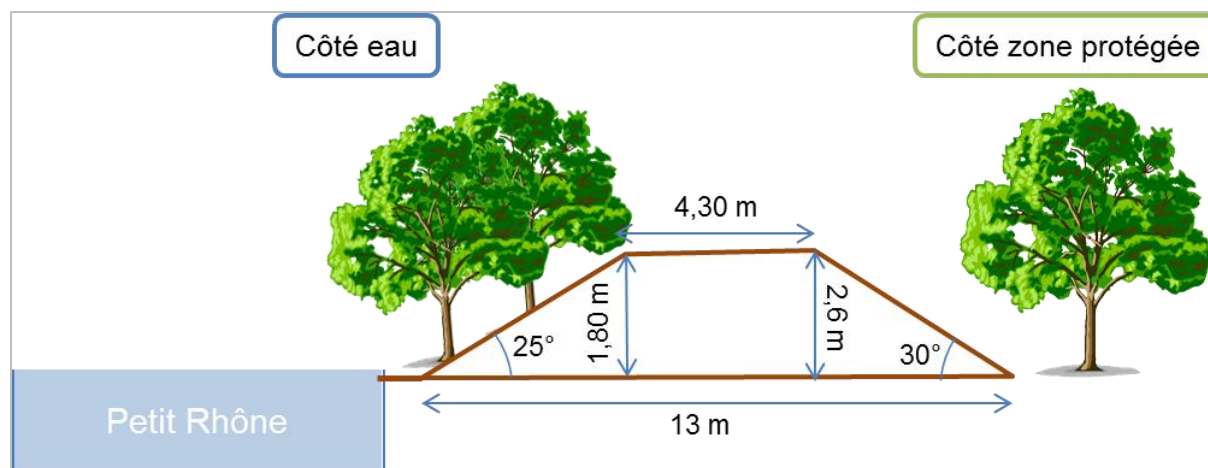
La Figure 74 illustre sa localisation en rive droite du petit Rhône (France, département du Gard, 30).



**Figure 74. Localisation de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur du Mas Marignan : (a) localisation (cercle rouge) à l'échelle du Petit Rhône en aval de Saint Gilles ; (b) zoom sur la localisation du tronçon de digue choisi.**

Ce tronçon est considéré comme homogène du point de vue de ses caractéristiques géométriques, géotechniques, hydrauliques et biologiques (présence d'arbres avec densité homogène sur l'ensemble du tronçon).

Les caractéristiques géométriques de ce tronçon sont reportées sur la Figure 75.



**Figure 75. Caractéristiques géométriques d'un profil en travers du tronçon de digue homogène évalué.**

La largeur du ségonnal<sup>10</sup> (d'après une mesure au décamètre effectué sur place) dans ce secteur de digue (Mas Marignan) est majoritairement inférieure à 7 mètres. C'est-à-dire que la digue est sujette à un risque d'affouillement plus ou moins prononcé.

Les sondages et essais géotechniques effectués en 2009 au cours de l'étude du renforcement et de décorsetage des digues du Petit Rhône (Digue rive droite du Petit Rhône entre l'écluse de Saint Gilles et le lieudit « Mas Neuf de Capette » comprenant le secteur du Mas Marignan – lot 3), permettent de

<sup>10</sup> Nom donné localement à la zone située entre le cours d'eau et le pied côté fleuve de la digue

connaître les caractéristiques géotechniques principales du remblai et de la fondation du tronçon à évaluer.

La végétation arborescente est principalement présente en pied de digue côté eau et côté zone protégée (Figure 76), bien que l'on retrouve quelques individus en milieu de talus coté eau. L'espèce principale est le peuplier.



**Figure 76.** Photo de la digue rive droite du Petit Rhône dans le secteur du Mas Marignan, bordé de végétation arborescente à chaque pied de l'ouvrage (photo : Bambara G., 2015)

## *1.2. Evaluation de la performance du tronçon Mas Marignan vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne*

Chacun des ingénieurs dispose d'une fiche de notation afin d'évaluer individuellement l'ensemble des indicateurs d'état (cf. Tableau 9). Après discussion, les ingénieurs experts donnent une note consensuelle à chaque indicateur d'état pour l'évaluation du tronçon.

Nous présentons ci-dessous les résultats de l'évaluation consensuelle des indicateurs d'état par les ingénieurs experts pour chaque critère fonctionnel relatif aux différents composants de ce tronçon : corps de digue, fondation, interface corps de digue-fondation<sup>11</sup>.

### *1.2.1. Evaluation des critères fonctionnels relatifs au corps de digue*

Deux critères sont à évaluer à partir des modèles d'agrégation des indicateurs d'état développés : le critère **C1, EI « Perméabilité du corps de digue »** et **C2, EI « Résistance du corps de digue à l'érosion interne »**. Le critère C3, EI est évalué directement à dire d'expert.

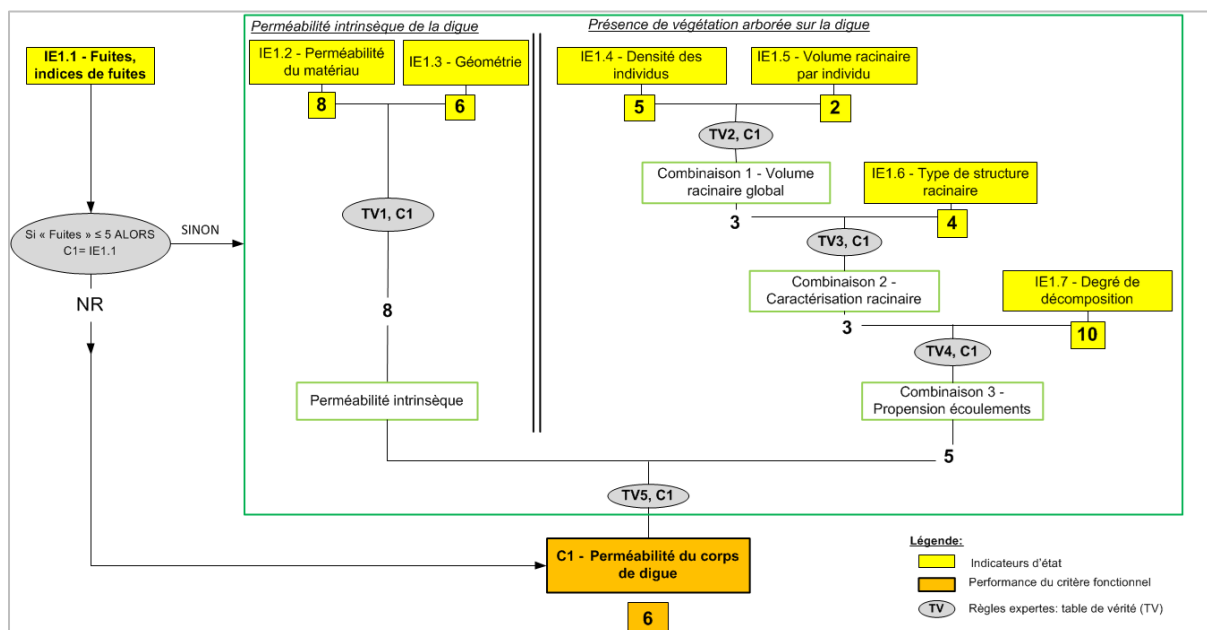
La Figure 77 illustre les notations consensuelles des indicateurs d'état permettant l'évaluation de C1, EI, qui est calculé par le modèle à la suite des combinaisons successives.

Aucune fuite (eau) ou indice de fuites (zones humides) n'est détectable. L'indicateur d'état direct IE1.1 n'est donc pas renseigné par les experts, il est noté « NR » (non renseigné) sur la fiche de

---

<sup>11</sup> Composant à évaluer, s'agissant d'une digue homogène sans dispositif de drainage.

notation. Les autres indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la perméabilité du corps de digue sont alors évalués.



**Figure 77. Evaluation par le modèle de la performance du critère fonctionnel C1, EI « Perméabilité du corps de digue » à partir des indicateurs d'état du tronçon homogène de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur Marignan (IE : Indicateurs d'état ; C : Critères fonctionnels ; EI : Erosion Interne)**

IE1.2 est évalué comme bon (score de 8). En effet, d'après les essais carottés effectués, le corps de digue est argilo-limoneux, ce qui offre une bonne perméabilité du matériau constituant le corps de digue. La géométrie de la digue est considérée comme moyenne, IE1.3 est donc évalué comme passable (score de 6). La combinaison de ces deux indicateurs d'état : IE1.2 et IE1.3 est obtenu à l'aide la table de vérité TV1. La perméabilité intrinsèque du corps de digue est alors évaluée comme bonne (score obtenu de 8).

La présence de végétation arborée sur le corps de digue est ensuite évaluée par le modèle à l'aide des indicateurs d'état spécifiques. IE1.4 a été évalué comme étant médiocre (note égale à 5) conformément aux références établies lors de sa formalisation c'est-à-dire avec présence d'un individu par 10 m<sup>2</sup>.

IE1.5 a été évalué comme mauvais (note égale à 2). En effet, comme l'illustre la Figure 78, l'arbre situé sur le profil représentatif du tronçon de digue à un diamètre au collet bien supérieur à 30 cm qui est la limite au-dessus de laquelle, les diamètres au collet de taille supérieure entraineront une mauvaise note.





**Figure 78. Gros peuplier présent sur le tronçon homogène évalué vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur Mas Marignan (photo : Bambara G., 2015)**

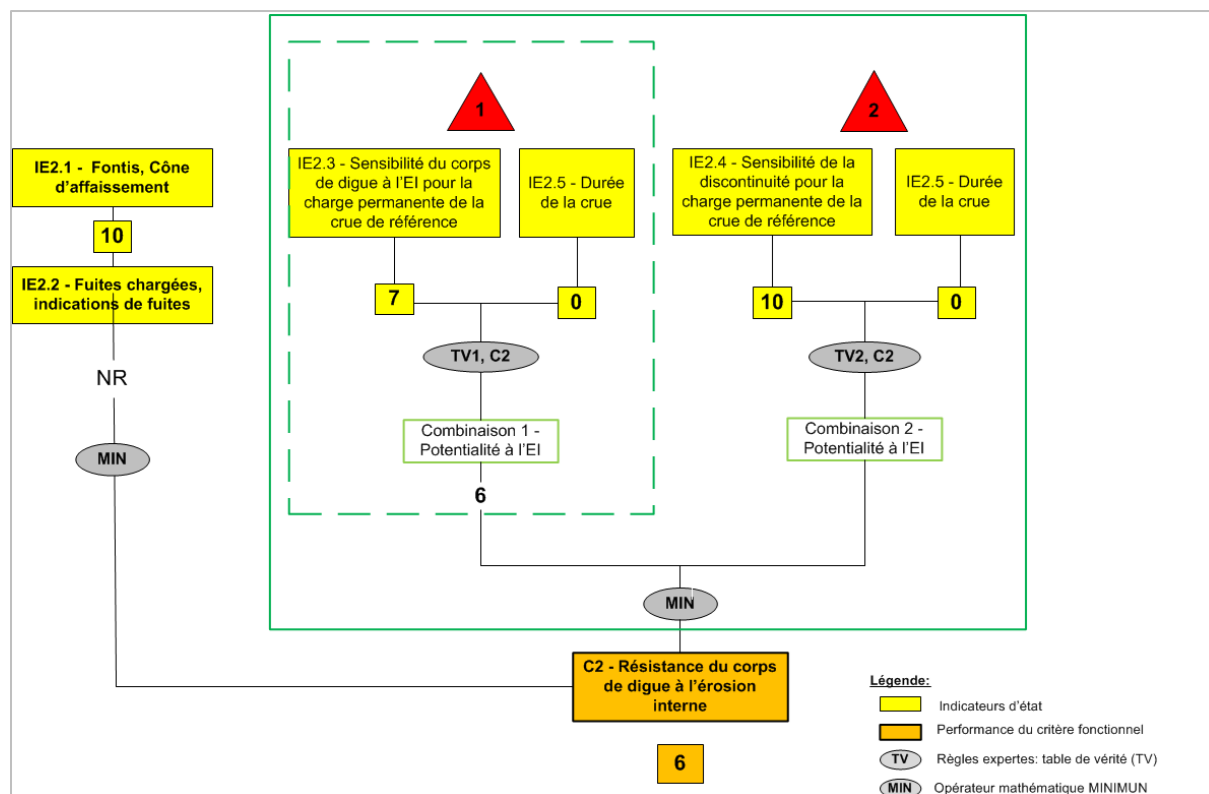
IE1.6 a été noté, à l'aide de la clé d'aide à l'identification de la structure racinaire potentielle d'un individu (Figure 57), comme étant médiocre (note obtenue de 4) pour les arbres présents sur ce tronçon.

Enfin, IE1.7 a été évalué comme étant très bon (note obtenue de 10). En effet, aucune souche ou arbre mort n'a été repéré par les évaluateurs sur ce tronçon.

La propension aux écoulements due à la présence de végétation arborescente a donc été calculée par le modèle comme étant médiocre (score obtenue de 5). La propension aux écoulements est combinée à la perméabilité intrinsèque de la digue à l'aide d'une dernière table de vérité (TV5). Cette ultime combinaison nous permet d'obtenir le résultat de **C1, EI « Perméabilité du corps de digue »** comme égale à 6 soit une performance passable.

L'évaluation de C2, EI est illustrée par la Figure 79.

Les indicateurs d'état direct : IE2.1 et IE2.2 n'ont pas été activés. Aucun fontis n'a été observé sur le tronçon et aucune fuite chargée n'est suspectée (rappelons que l'évaluation n'ayant pas eu lieu en période de crue ou post-crue, il est difficile de juger de cet indicateur. Contrairement à l'indicateur IE2.1 qui est évalué comme très bon (note de 10), l'indicateur IE2.2 n'est pas évalué et est noté « Non Renseigné (NR) ».



**Figure 79. Evaluation par le modèle de la performance du critère fonctionnel C2, EI « Résistance du corps de digue à l'érosion interne » à partir des indicateurs d'état du tronçon homogène de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur Marignan (IE : Indicateurs d'état ; C : Critères fonctionnels ; EI : Erosion Interne)**

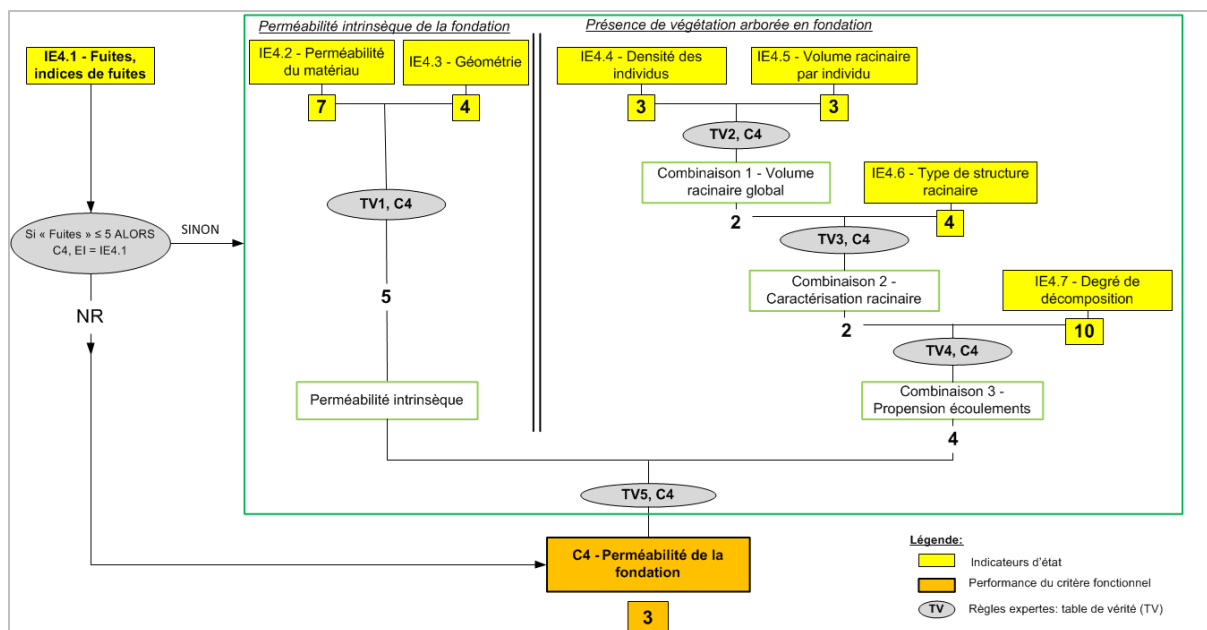
Sur le tronçon de digue évalué, aucune discontinuité remblai-remblai due à un rehaussement de l'ouvrage ou au comblement d'une brèche n'est présente. Ainsi, seule la combinaison des indicateurs d'état IE2.3 et IE2.5 permet d'obtenir la potentialité d'érosion interne (soit le cas 1 sur la Figure 79) et ainsi le résultat de **C2, EI** qui évalué par le modèle comme passable (score obtenu de 6) (cf. Figure 79). Notons que IE2.5 a été noté comme inacceptable (0) par les experts sachant que la crue la plus défavorable est estimée longue au regard de la taille et de la perméabilité de l'ouvrage.

Le critère fonctionnel **C3, EI « Singularité dans le corps de digue »** est évalué directement à dire d'expert. Sur ce tronçon, aucun ouvrage traversant, ni terrier dû à des animaux fouisseurs n'est présent ; les experts évaluent donc la performance de ce critère comme très bonne (note de 10).

### 1.2.2. Evaluation des critères fonctionnels relatifs à la fondation

Trois critères sont nécessaires pour l'évaluation de la performance de la fondation : C4, EI, C5, EI et C6, EI. Nous utilisons les modèles d'agrégation des indicateurs d'état développés pour l'évaluation de C4, EI et C5, EI. C6, EI est évalué à dire d'expert.

L'évaluation du critère fonctionnel **C4, EI « Perméabilité de la fondation »** est présenté sur la Figure 80.



**Figure 80. Evaluation par le modèle du critère fonctionnel C4, EI « Résistance de la fondation à l'érosion interne » à partir des indicateurs d'état du tronçon homogène de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur Marignan (IE : Indicateurs d'état ; C : Critères fonctionnels ; EI : Erosion Interne)**

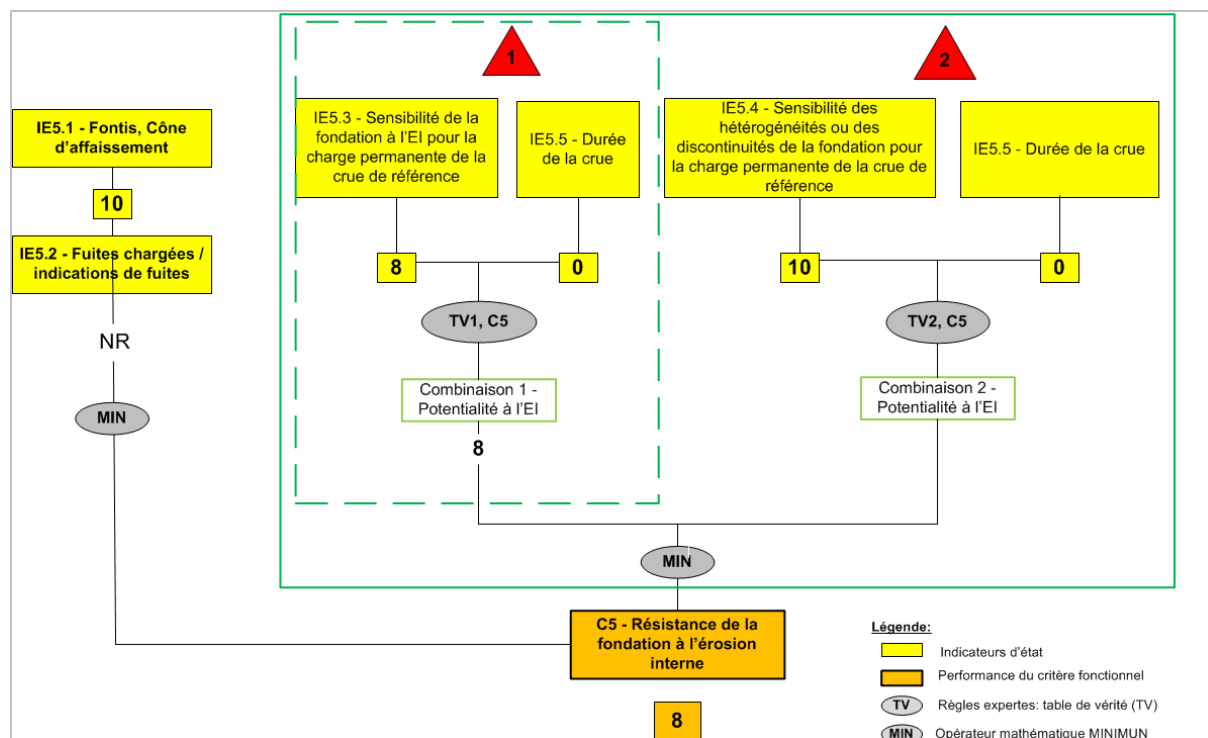
Les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de **C4, EI** sont combinés selon la même logique phénoménologique que pour l'évaluation de **C1, EI**.

Aucune fuite d'eau claire n'est détectée sur le terrain par les évaluateurs. L'indicateur d'état direct IE4.1 est noté comme « Non renseigné » (NR). La perméabilité intrinsèque de la fondation est médiocre. L'évaluation de la propension aux écoulements de la fondation due à la présence de végétation arborescente est du même ordre de grandeur que pour le corps de digue car la plus part des arbres sont situés au niveau du pied de digue. Ainsi, l'évaluation par le modèle de **C4, EI** est mauvaise (score obtenue de 3).

L'évaluation de **C5, EI** est bonne (score obtenu de 8) (Figure 81). Similairement au corps de digue, les indicateurs d'état direct IE5. 1 et IE 5.2 ne sont pas activés.

Aucune discontinuité n'étant présente en fondation, IE5.4 est évalué comme très bon (note de 10).

La potentialité d'érosion interne résulte donc de la seule combinaison des indicateurs d'état IE5.3 et IE5.5 (cas 1 sur la Figure 81). Cette potentialité d'érosion interne est calculée par le modèle comme étant bonne (score obtenu de 8), ce qui implique que **C5, EI** est évalué comme étant bon (Figure 81).



**Figure 81. Evaluation par le modèle de la performance du critère fonctionnel C5, EI « Résistance du corps de digue à l'érosion interne » à partir des indicateurs d'état du tronçon homogène de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur Marignan (IE : Indicateurs d'état ; C : Critères fonctionnels ; EI : Erosion Interne)**

**C6, EI** est évalué directement à dire d'expert. Sur ce tronçon de digue homogène, aucun ouvrage traversant, ni terrier due à des animaux fouisseurs n'est présent, les experts évaluent donc ce critère comme très bon (note de 10).

### 1.2.3. Evaluation des critères fonctionnel relatifs à l'interface corps de digue fondation

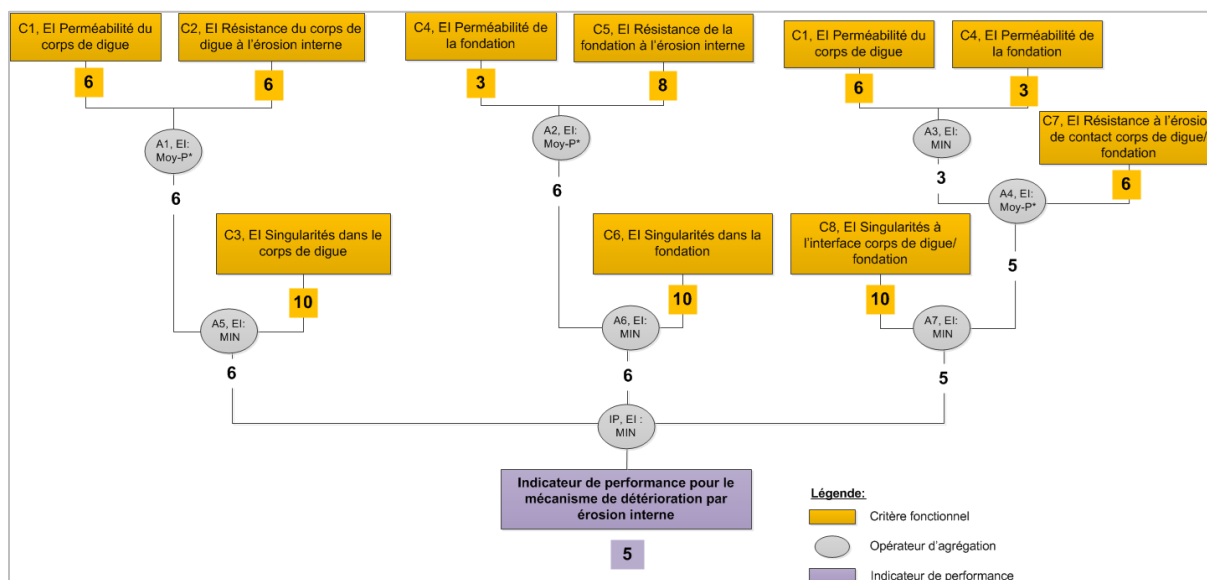
La perméabilité à l'interface corps de digue-fondation est évaluée par le modèle en utilisant l'opérateur mathématique minimum (MIN) entre **C1, EI** et **C4, EI**. Ce tronçon de digue présente essentiellement une végétation arborescente aux alentours de cette zone d'interface au niveau des pieds de digue. Une évaluation spécifique de la végétation arborescente au niveau de la zone d'interface pour les critères C1, EI et C2, EI n'est donc pas nécessaire. Le minimum (MIN) entre ces deux critères fonctionnels (C1, EI et C2, EI) est sélectionné par le modèle.

Aucune fuite, résurgence ou venue d'eau chargée n'est détectable sur le terrain par les évaluateurs. L'indicateur d'état direct IE7.1 « Fuites, résurgences, venue d'eau chargée » permettant l'obtention de **C7, EI « Résistance à l'érosion de contact corps de digue-fondation »** n'est donc pas activé. C7, EI est donc évaluée à partir de la combinaison des indicateurs d'état IE7.2 « Sensibilité à l'érosion interne de contact à l'interface pour la charge permanente de la crue de référence » et IE7.3 « Durée de la crue (crue la plus défavorable) ». IE7.2 est considéré comme passable (note de 7). Pour la crue la plus défavorable, IE7.3 « Durée de la crue » est considéré comme inacceptable (note donné de 0). La combinaison par le modèle de ces deux indicateurs d'état donne un score passable (score de 6) pour C7, EI.

**C8, EI « Singularité à l'interface corps de digue-fondation »** est évalué directement à dire d'expert. Sur ce tronçon de digue homogène, aucun ouvrage traversant, ni terrier due à des animaux fouisseurs n'est présent, les experts évaluent donc la performance de ce critère comme très bonne (note de 10).

### 1.2.4. Evaluation de la performance du tronçon de digue

Afin d'évaluer l'indicateur de performance de ce tronçon de digue, nous utilisons le modèle développé par Vuillet (2012) qui permet selon une logique fonctionnelle d'agréger les critères fonctionnels relatifs à chaque composant. La Figure 82 illustre les résultats des évaluations de l'ensemble des critères fonctionnels à partir des indicateurs d'état correspondants, les résultats des agrégations faites au sein de ce modèle, ainsi que le résultat final correspondant à la performance du tronçon vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne.



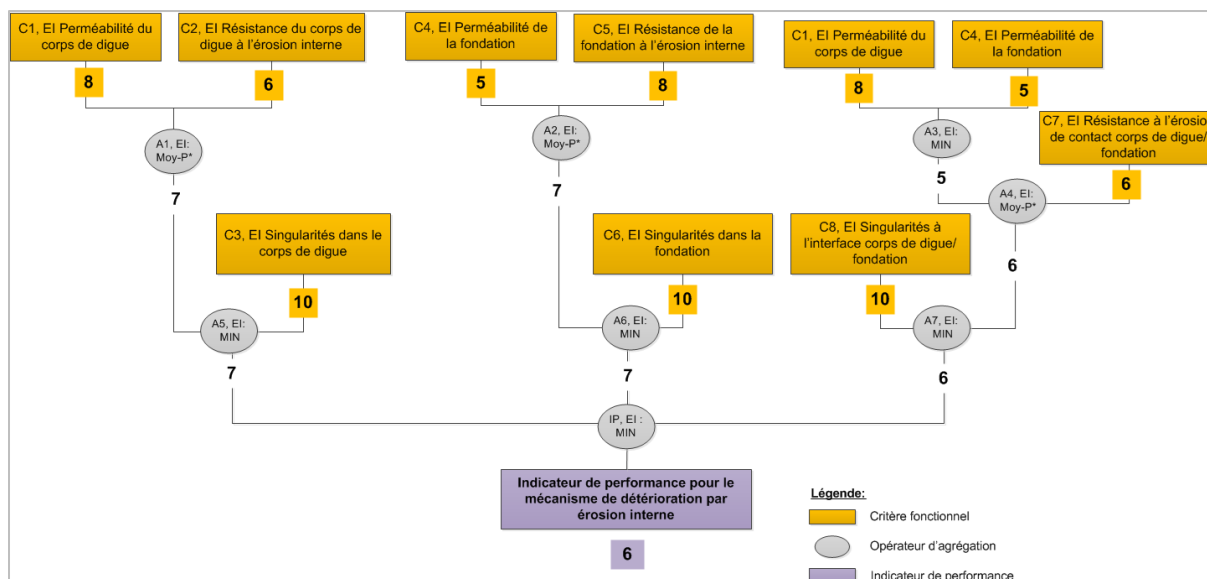
**Figure 82. Evaluation par le modèle de la performance vis-à-vis de l'érosion interne du tronçon homogène de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur Mas de Marignan à partir de la performance des critères fonctionnels (C : Critères fonctionnels ; EI : Erosion Interne, IP : Indicateur de Performance, MIN : Minimum, Moy.p\* : Moyenne Pondérée [Moy (1/3) Ci, EI ; (2/3) Cj, EI])**

Suite aux agrégations (A5, EI ; A6, EI ; A7, EI), nous obtenons la performance de chaque composant du tronçon de digue, soit respectivement les scores de 6 (passable) pour le corps de digue, 6 (passable) pour la fondation et 5 (médiocre) pour l'interface corps de digue-fondation. Ainsi, nous pouvons cibler les composants pour lesquels il est nécessaire de prévoir une surveillance renforcée ou d'éventuels travaux.

L'indicateur de performance de ce tronçon vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne obtient finalement un score médiocre de 5 (cf. Figure 82).

La végétation arborescente influence les résultats de **C1, EI** et **C4, EI** qui passent respectivement de 6 à 8 et de 3 à 5 avec et sans prise en compte de la végétation arborescente. La Figure 83 présente ces résultats et la note de la performance du tronçon de digue sans prise **en compte de la végétation arborescente**. Ce résultat montre dans ce cas, que la performance du tronçon de digue vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne est passable (score obtenue par le modèle de 6).





**Figure 83. Evaluation par le modèle de la performance vis-à-vis de l'érosion interne du tronçon homogène de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur Mas de Marignan à partir de la performance des critères fonctionnels sans prendre en compte la présence de la végétation arborescente (C : Critères fonctionnels ; EI : Erosion Interne, IP : Indicateur de Performance, MIN : Minimum, Moy.p\* : Moyenne Pondérée [Moy (1/3) Ci, EI ; (2/3) Cj, EI])**

Sur cet exemple, la prise en compte de la végétation arborescente dans le modèle d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai à charge temporaire vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne dégrade de manière non négligeable C1, EI et C4, EI (dégradation de deux unités pour chacun des deux critères) et au final, dégrade d'une unité avec un changement de catégorie (passage de médiocre à passable), la performance du tronçon évalué. En effet, même si C1, EI passe d'une catégorie passable à bonne sans prise en compte de la végétation et C4, EI d'une catégorie mauvaise à médiocre, les critères C2, EI (passable), C5, EI (bon) et C7, EI (passable), relatifs à la résistance à l'érosion du composant considéré, contrebalancent l'effet dégradant de la présence de végétation sur la performance des composants et in fine du tronçon. Cet effet de la présence de végétation est atténué par le fait que les combinaisons des critères {C1, EI ; C2, EI}, {C4, EI ; C5, EI} et {MIN de C1, EI/C4, EI ; C7, EI} sont effectuées avec une moyenne pondérée qui donne plus de poids aux critères relevant de la résistance à l'érosion (C2, EI ; C5, EI et C7, EI).

La performance vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne du tronçon évalué obtenue avec l'utilisation du modèle est cohérente avec l'avis des experts.

### *1.3. Evaluation de la performance du tronçon Mas Marignan vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement*

De manière analogue au travail effectué vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne, les évaluateurs disposent d'une fiche de notation afin d'évaluer chacun des indicateurs d'état. Une notation individuelle de chacun des ingénieurs est réalisée et une notation consensuelle auprès des trois ingénieurs experts constituant le groupe d'expertise est donnée. Nous présentons les résultats issus de cette notation consensuelle.

#### *1.3.1. Evaluation des critères fonctionnels relatifs au corps de digue*

La performance du corps de digue vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement est évalué à l'aide de deux critères fonctionnels **C1, AFF « Résistance à l'affouillement de la protection du corps de digue côté cours d'eau »** et **C2, AFF « Résistance à l'affouillement du corps de digue »**. Le tronçon du Mas de Marignan ne dispose pas de protection du corps de digue ; aussi, seul **C2, AFF** est évalué à partir des indicateurs d'état correspondants.

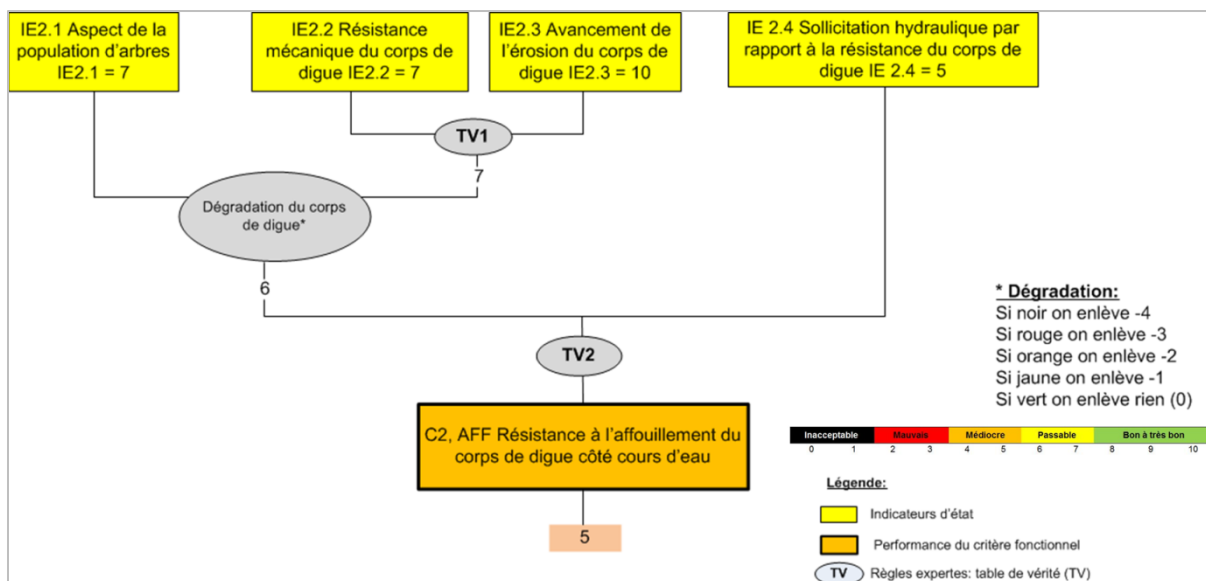
La Figure 84 présente les notations consensuelles des indicateurs d'état permettant l'évaluation de C2, AFF. Elle présente également les résultats des agrégations intermédiaires, ainsi que le score de performance obtenu pour ce critère.

L'indicateur d'état IE2.2 « *Résistance mécanique du corps de digue* » a été évalué comme passable (note de 7) de par la géométrie moyenne du tronçon évalué et les matériaux constitutifs du corps de digue qui présentent une cohésion à priori correcte.

L'indicateur d'état IE2.3 « *Avancement de l'érosion du corps de digue* » est évalué comme très bon (note de 10). En effet, à l'instant « t » de l'évaluation sur le terrain aucune érosion du corps de digue n'est relevée.

La combinaison de l'IE2.2 et IE2.3 donne un résultat passable (note de 7). Cette note est dégradée d'un point (note finale de la combinaison égale à 6) de par la présence de l'indicateur d'état IE2.1 « *Aspect de la population d'arbres* » sur le talus côté eau qui a été évalué comme passable (note de 7).

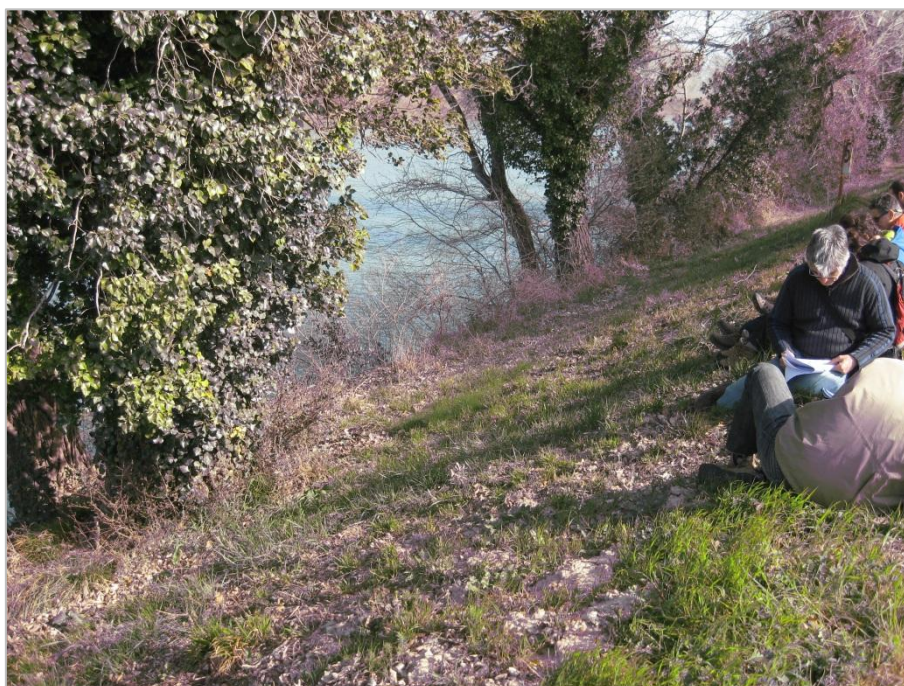
Finalement, le score de performance obtenu pour **C2, AFF** s'avère être médiocre (score de 5) suite à l'agrégation de la combinaison des indicateurs IE2.1, IE2.2 et IE2.3 et de l'indicateur d'état IE2.4 « *Sollicitation hydraulique par rapport à la résistance du corps de digue* ».



**Figure 84. Evaluation par le modèle de la performance du critère fonctionnel C2, AFF « Résistance à l'affouillement du corps de digue côté cours d'eau » à partir des indicateurs d'état du tronçon homogène de la digue rive droite du Petit Rhône, secteur Marignan (IE : Indicateurs d'état ; C : Critères fonctionnels ; AFF : Affouillement)**

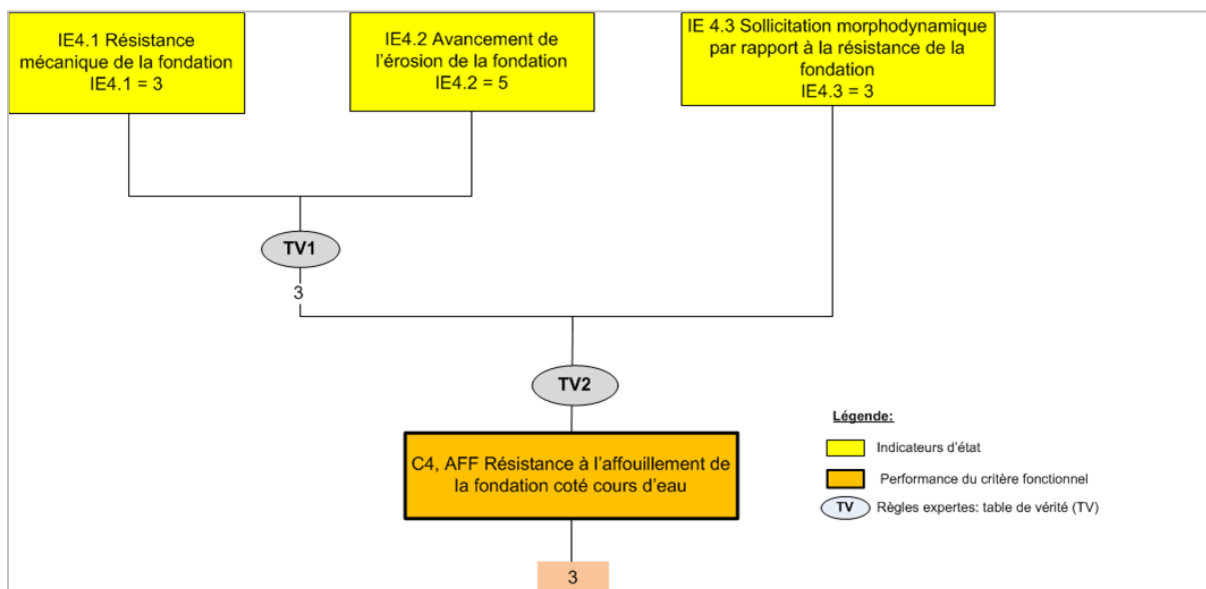
### 1.3.2. Evaluation de la performance des critères fonctionnels relatifs à la fondation

L'évaluation de la performance de la fondation vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement nécessite uniquement l'évaluation du critère fonctionnel N°4 : **C4, AFF « Résistance à l'affouillement de la fondation »**. En effet, il n'y a pas de protection de la fondation et comme illustré par la Figure 85, la fondation de l'ouvrage est directement au contact du Petit Rhône sur le tronçon évalué.



**Figure 85. Vue du tronçon de digue homogène évalué côté cours d'eau (photo : Bambara G., 2015)**

La Figure 86 présente les notes consensuelles données par les experts en vue d'obtenir un score de performance du critère C4, AFF. Le résultat de la performance de ce dernier est calculé par le modèle.



**Figure 86. Evaluation par le modèle de la performance du critère fonctionnel C4, AFF « Résistance à l'affouillement de la fondation côté cours d'eau » à partir des indicateurs d'état du tronçon homogène de la digue rive droite du petit Rhône, secteur Marignan (IE : Indicateurs d'état ; C : Critères fonctionnels ; AFF : Affouillement)**

IE4.1 est considéré comme mauvais (note de 3). Ceci résulte notamment de l'absence de ségonnal (i.e. contact direct du pied de digue avec le fleuve, cf. Figure 85)

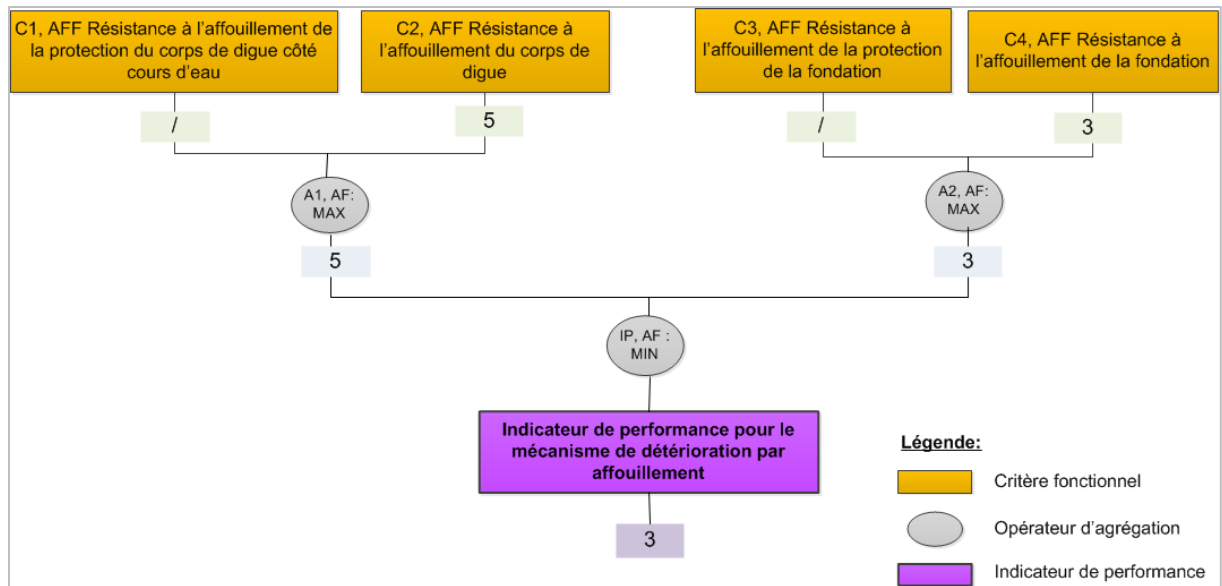
Une érosion modérée de la fondation est observée par les évaluateurs. IE4.2 est donc médiocre.

L'agrégation par le modèle de ces deux indicateurs d'état permet d'obtenir une note de diagnostic de l'état actuel de la fondation (sans tenir compte des sollicitations). On obtient un score de 3 (mauvais). La combinaison dans le modèle de ce résultat avec IE4.3 « *Sollicitation morphodynamique par rapport à la résistance de la fondation* » (note de 3 due à l'estimation par les experts de la vitesse locale d'écoulement aggravé par d'éventuels corps flottant érosif) donne le résultat « mauvais » pour C4, AFF (score de 3).

### 1.3.3. Evaluation de la performance du tronçon de digue

L'évaluation de la performance du tronçon de digue choisi vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement est réalisée par le modèle développé par Vuillet (2012). La Figure 87 présente le résultat obtenu pour l'indicateur de performance à partir des résultats d'évaluation de C2, AFF et C4, AFF.

L'indicateur de performance est obtenu par l'opérateur mathématique MIN qui retient la note minimale entre C2, AFF et C4, AFF. La performance vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement du tronçon du Mas Marignan est mauvaise (score de 3). Ce résultat est en accord avec l'opinion du groupe d'expertise qui, sans utilisation du modèle, juge mauvaise la performance de ce tronçon de digue vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement, en raison de la géométrie de la fondation de l'ouvrage (absence de ségonnal) et de la sollicitation hydraulique de la prochaine crue morphogène.



**Figure 87. Evaluation par le modèle de la performance vis-à-vis de l'affouillement du tronçon homogène de la digue rive droite du petit Rhône, secteur Mas de Marignan à partir de la performance des critères fonctionnels (C : Critères fonctionnels ; AFF : Affouillement, IP : Indicateur de Performance, MIN : Minimum, MAX : Maximum)**

L'influence de la présence de végétation arborescente sur l'évaluation de la performance de ce tronçon de digue est ici négligeable compte tenu du score obtenu pour le critère de résistance à l'affouillement de la fondation. En effet, dans cette application, que l'indicateur IE2.1 «*Aspect de la population d'arbres* » soit passable ou très bon (note de 10 - absence d'arbre), cela ne modifie pas le résultat de C2, AFF calculé par le modèle puisque le modèle d'agrégation des critères fonctionnels utilise l'opérateur MIN (A1, AFF ; A2, AFF) pour obtenir l'indicateur de performance du tronçon vis-à-vis de l'affouillement.

## **2. Synthèse et discussion des résultats obtenus**

### **2.1. Synthèse des résultats d'évaluation de la performance des tronçons de digue du Petit Rhône**

Les résultats des trois applications réalisées sur les digues du Petit Rhône visant à évaluer leur performance vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne et affouillement sont synthétisés respectivement sur le Tableau 29 et le Tableau 30. Un bref descriptif des tronçons de digue du Petit Rhône rive gauche, secteur du Mas de Cazeneuve et secteur du bois de Beaumont est disponible en ANNEXE 5. Ces tableaux présentent pour chacun des trois sites : les résultats de chaque critère fonctionnel permettant l'évaluation d'un indicateur de performance vis-à-vis du mécanisme de détérioration étudié (le cas échéant en considérant la végétation et sans la considérer) ; le résultat de l'indicateur de performance correspondant.

Pour l'évaluation de la performance vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne (Tableau 29), nous notons que la prise en compte de la végétation arborescente a une influence non négligeable sur la dégradation de la performance des critères fonctionnels concernés par la végétation, soit : **C1, EI** et **C4, EI**, pour les trois tronçons de digue évalués, ainsi que sur le score de l'indicateur de performance. Par exemple, pour le tronçon, Mas Cazeneuve l'évaluation de C1, EI passe de bonne (score de 9) à mauvaise (score de 2) avec la prise en compte de la végétation arborescente. Ainsi, la performance vis-à-vis de l'érosion interne passe de mauvaise (score de 3) à passable (score de 6) respectivement avec et sans prise en compte de la végétation arborescente, soit un écart de trois points sur l'échelle quantitative avec changement de deux catégories. Les résultats de performance du tronçon du Bois de Beaumont sont assez similaires avec ceux obtenus pour le Mas Marignan : dégradation d'un point sur l'échelle quantitative si prise en compte de la végétation mais sans changement de catégorie contrairement au tronçon du Mas de Cazeneuve (Tableau 29).

La prise en compte de la végétation arborescente dans le modèle d'évaluation de la performance vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne permet d'affiner celui-ci et de se rapprocher de la performance réelle de ces ouvrages.

L'évaluation de la performance des trois tronçons vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement montre que la prise en compte de la végétation arborescente n'est pas négligeable dans la dégradation de la performance des critères fonctionnels. Les critères C1, AFF et C3, AFF ne sont pas évalués car les tronçons ne possèdent pas de protection du corps de digue et de la fondation. Par contre l'effet de la dégradation de l'évaluation de **C2, AFF «Résistance à l'affouillement du corps de digue côté cours d'eau »** due à la présence de végétation est avéré pour le tronçon du Mas de Cazeneuve (Tableau 30) qui passe d'une performance médiocre à mauvaise lorsque la végétation arborescente est prise en compte (soit une perte de deux points sur l'échelle et un changement de catégorie). Il n'y a pas eu d'effet sur le score de la digue de Marignan bien que de gros arbres étaient tout de même présents. Il ressort de ces applications qu'un travail de réflexion est encore nécessaire autour de la formalisation de l'indicateur IE2.1 «*Aspect de la population d'arbres* » ou bien sur la prise en compte la présence d'arbres dans l'évaluation du composant « fondation ».

La végétation arborescente n'est pas prise en compte dans l'évaluation de C2, AFF du tronçon du Bois de Beaumont car celle-ci n'est présente que côté zone protégée de la digue (Tableau 30).

Nous rappelons que les formalisations et les structures d'agrégation des indicateurs d'état permettant l'évaluation de chacun des critères fonctionnels n'étaient pas achevées lors de l'application réalisée sur les digues du Petit Rhône. La mauvaise formalisation des indicateurs d'état IE4.1, IE4.2 et IE4.3 et les informations limitées disponibles sur les tronçons du Mas de Cazeneuve et du bois de Beaumont expliquent l'absence de résultats pour l'évaluation de C4, AFF puis de l'indicateur de performance IP, EI pour ces tronçons (Tableau 30). Les indicateurs d'état ont été modifiés, complétés

et / ou affinés à la suite de ces applications de terrain lors d'une séance de travail spéciale avec le groupe d'expertise.

**Tableau 29. Synthèse des résultats des applications réalisées sur les tronçons de digue du petit Rhône. Evaluation de la performance par le modèle des critères fonctionnels et de l'indicateur de performance avec ou sans prise en compte de la végétation arborescente vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne.**

Localisation	C1, EI		C2, EI	C3, EI		C4, EI		C5, EI	C6, EI	C7, EI	C8, EI	IP, EI	
	Végétation	Sans végétation		Végétation	Sans végétation							Végétation	Sans végétation
Mas de Marignan	6	8	6	10	3	5	8	10	6	10	5	6	6
Mas de Cazeneuve	2	9	4	10	6	9	7	10	8	10	3	6	6
Bois de Beaumont	5	8	4	10	/	8	8	10	8	10	4	5	5

**Tableau 30. Synthèse des résultats des applications réalisées sur les tronçons de digue du petit Rhône. Evaluation de la performance par le modèle des critères fonctionnels et de l'indicateur de performance avec ou sans prise en compte de la végétation arborescente vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement.**

Localisation	C1, AFF		C2, AFF		C3, AFF		C4, AFF		IP, EI	
	Végétation	Sans végétation	Végétation	Sans végétation	Végétation	Sans végétation	Végétation	Sans végétation	Végétation	Sans végétation
Mas de Marignan	/	/	5	5	/	/	3	3	3	3
Mas de Cazeneuve	/	/	3	5	/	/	/	/	/	/
Bois de Beaumont	/	/	/	7	/	/	/	/	/	/



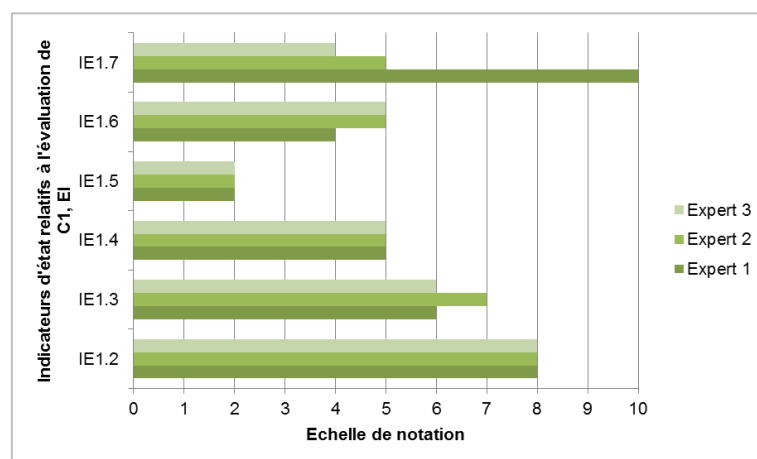
### 2.3. Vérification de la reproductibilité et de la répétabilité des résultats

L'utilisation par les ingénieurs des grilles de formalisation permettant l'évaluation de chacun des indicateurs d'état a permis de faire apparaître les améliorations nécessaires à apporter à la description initiale. En effet, certaines grilles ont suscité des interrogations auprès des ingénieurs évaluateurs qui n'ont de fait, pas pu évaluer les indicateurs correspondants. Nous nous sommes également attachés à vérifier la reproductibilité des notations entre les différents ingénieurs pour les autres indicateurs.

La dispersion des notes attribuées aux différents indicateurs d'état est importante à caractériser afin de vérifier la reproductibilité des évaluations de chaque indicateur à partir de sa grille de formalisation. Nous présentons une partie des traitements effectués afin de vérifier la reproductibilité de l'utilisation des grilles réalisées pour les indicateurs relevant de l'évaluation de la performance du corps de digue vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne du tronçon de Marignan.

#### 2.3.1. Reproductibilité et répétabilité des notations des indicateurs d'état par les « experts »

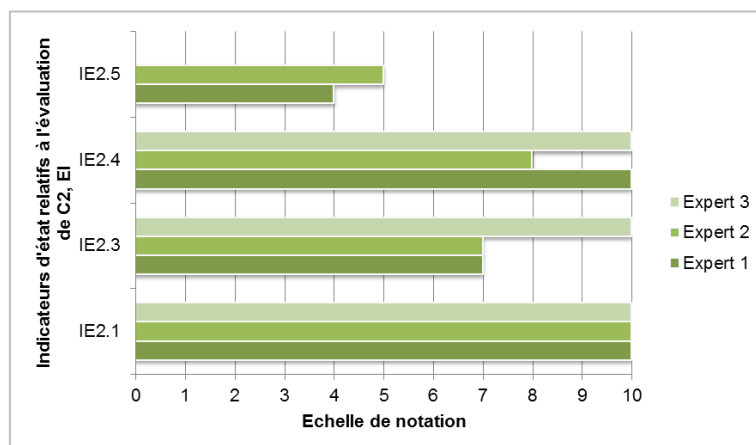
Nous comparons en premier lieu la reproductibilité de l'utilisation des grilles à travers les résultats des notations individuelles de chacun des trois experts. La Figure 88 représente les notations de chacun des indicateurs d'état relatifs à l'évaluation par le modèle du critère C1, EI « **Perméabilité du corps de digue** ». Nous considérons que le changement d'un point sur l'échelle de notation n'influe pas sur la qualité de la formalisation de l'indicateur (influence à partir d'un écart supérieur à deux points). Dans cet exemple, c'est le cas des indicateurs IE1.3 et IE1.6. Les indicateurs IE1.2, IE1.4 et IE1.5 ont obtenu les mêmes notations. Une précision a dû être apportée à la formalisation de l'indicateur d'état IE1.7 « *Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu* ». En effet, le fait que des racines ligneuses puissent être en décomposition sur un individu vivant était envisagé dans la première version de la grille mais cette possibilité amène à trop d'interrogations quant à l'attribution d'une note. La discussion consensuelle entre les experts a abouti à la décision de ne prendre en compte que les individus morts pour IE1.7.



**Figure 88. Représentation des notations des indicateurs d'état relatifs au critère C1, EI « Perméabilité du corps de digue » par chacun des trois experts (IE : Indicateur d'Etat ; Ci : critères)**

La Figure 89 illustre les notations des indicateurs d'état réalisées par les experts pour l'évaluation de C2, EI « **Résistance du corps de digue à l'érosion interne** ». Les grilles des indicateurs IE2.3 « *Sensibilité du corps de digue à l'érosion interne pour la charge permanente de la crue de référence* », IE2.4 « *Sensibilité de la discontinuité pour la charge permanente de la crue de référence* » et IE2.5 « *Durée de la crue* » sont à améliorer en modifiant et affinant les références précédemment établies. En effet, dans les trois cas, l'un des experts donne une note variant de plus de deux points par rapport aux deux autres. L'expert 3 donne par exemple une note de 0 à l'indicateur IE2.5. La reproductibilité des notations est donc discutable. Il s'agit de comprendre les raisons qui

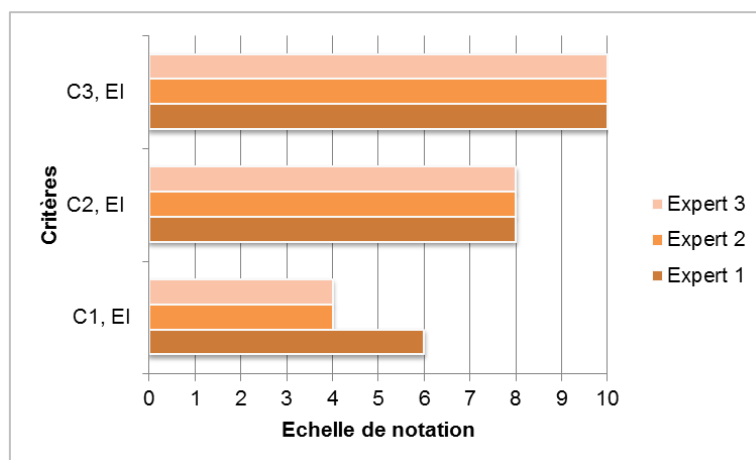
entraînent ces écarts de notations et à modifier en conséquence l'échelle de notation ou la définition de l'indicateur.



**Figure 89.** Représentation des notations des indicateurs d'état relatifs au critère C2, EI « Résistance à l'érosion interne du corps de digue » par chacun des trois experts (IE : Indicateur d'Etat ; Ci : critères)

### 2.3.2. Evaluations des critères fonctionnels et d'un indicateur de performance à partir des notations individuelles des indicateurs d'état par les « experts »

Nous calculons les scores des critères fonctionnels C1, EI et C2, EI pour les trois experts (Figure 90). Le critère C3, EI a été évalué à dire d'« expert » comme très bon (note de 10) par les trois experts puisque aucun ouvrage traversant ni terrier d'animaux n'a été relevé sur le terrain.



**Figure 90.** Représentation des résultats obtenus par le modèle pour l'évaluation des critères fonctionnels pour chacun des trois experts (C1, EI « Perméabilité du corps de digue », C2, EI « Résistance du corps de digue à l'érosion interne » et C3, EI « Singularité dans le corps de digue »)

Seul C1, EI montre une différence de score entre les experts. L'expert 1 qui avait noté l'indicateur IE1.7 comme très bon (10) obtient après calcul par le modèle un score passable (6) pour le critère C1, EI. Les deux autres experts obtiennent un score médiocre (4). Ces résultats montrent que le poids de l'indicateur IE1.7 dans le modèle d'agrégation n'est pas négligeable. La nécessité d'amélioration de la grille de formalisation de cet indicateur est également confirmée par les différences observées au niveau du résultat du critère. Notons que pour comprendre plus finement l'influence de chaque indicateur sur le résultat final, nous aurions pu envisager de réaliser une analyse de sensibilité.

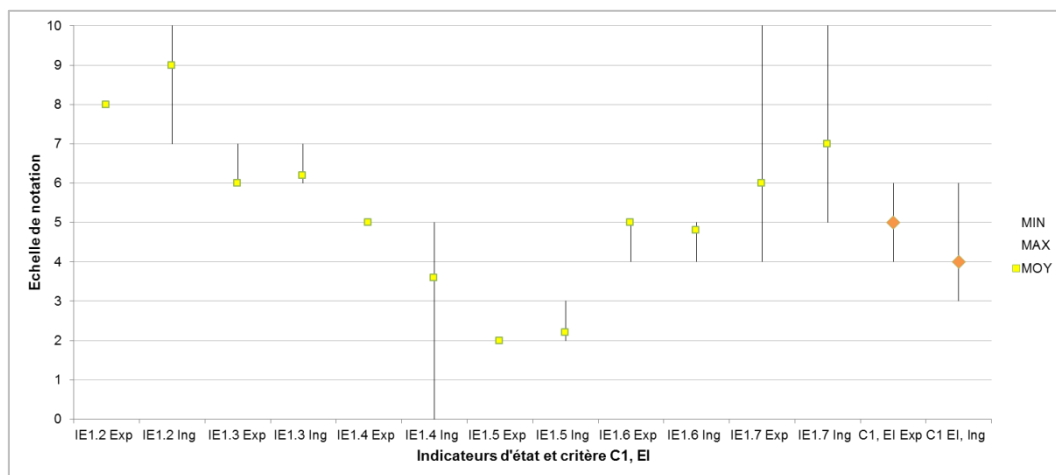
Malgré les différences observées entre les notations des indicateurs d'état IE2.3, IE2.4 et IE2.5, nous n'obtenons aucun écart entre les résultats du critère C2, EI pour les trois experts. Le modèle d'agrégation compense les écarts de note entre les indicateurs mais pour plus de sécurité vis-à-vis des résultats l'amélioration des grilles est tout de même nécessaire.

Finalement, le résultat du calcul par le modèle de **la performance du corps de digue** pour chacun des experts donnent un score de 7 soit, une performance passable du corps de digue vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne. Ce résultat est notamment dû au fait que le critère, C2, EI, a un poids plus important que C1, EI dans le modèle d'agrégation des critères fonctionnels. Lors de la notation consensuelle des experts (Figure 82), le résultat de performance du corps de digue obtenu est également passable : score de 6, soit une variation d'un point sur l'échelle de notation sans changement de catégorie.

Les résultats obtenus par chaque expert pour l'évaluation des critères fonctionnels et l'indicateur de performance du corps de digue vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne reflètent leur opinion. Il en est de même pour les autres composants de l'ouvrage (fondation et interface) ainsi que pour les autres tronçons évalués. Concernant l'évaluation des tronçons vis-à-vis du mécanisme d'affouillement, les résultats n'ont pas été comparés puisque le développement des grilles et des modèles d'agrégation n'était pas achevé au moment de l'application terrain.

### 2.3.3. Reproductibilité des notes par l'ensemble des évaluateurs

Pour vérifier la reproductibilité des notations des indicateurs d'état à partir des grilles développées, nous testons les différences de l'ensemble des notes attribués par chaque évaluateur en scindant ces derniers en deux groupes : « experts » et « ingénieurs » (ingénieurs confirmés, ingénieur débutant, ingénieurs stagiaires). Pour ces deux groupes nous avons calculé, à partir des notes individuelles de chaque évaluateur, un minimum, un maximum et une moyenne. La Figure 91 illustre les résultats obtenus pour l'évaluation de C1, EI « **Perméabilité du corps de digue** ».



**Figure 91. Graphique représentant les notations des indicateurs d'état par les groupes d'évaluateurs « experts » et « ingénieurs » et résultat de l'évaluation du critère C1, EI « Perméabilité du corps de digue » à partir du modèle développé pour ces deux groupes**

Nous observons peu de différence entre les moyennes des deux groupes d'évaluateurs. Comme dans le cas des comparaisons des notations individuelles entre les trois experts, aucun écart entre les résultats des deux groupes ne dépasse un point. A l'intérieur de chaque groupe, nous observons les variations de note minimale et maximale pour les différents indicateurs d'état. L'indicateur d'état IE1.7 comporte des écarts importants autant pour le groupe d'« experts » que pour celui d'« ingénieurs ». Des précisions dans la formalisation de cet indicateur ont été apportées notamment par le fait que la décomposition est désormais prise en compte uniquement sur des individus morts

(partie 4, chap. 1, section 2.3.1). La différence des résultats de C1, EI est acceptable puisque nous obtenons une différence d'un point sur l'échelle de notation entre les deux groupes. Ces résultats tendent à montrer que les formalisations réalisées semblent suffisamment précises pour être utilisées par des ingénieurs non qualifiés.

## Chapitre 2. Applications sur des barrages en remblai

Dans le cadre du projet RISBA, la performance vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne de 3 barrages italiens et 4 barrages français a été évaluée en utilisant les modèles développés (Figure 92). Parmi ces sept ouvrages, nous avons rencontré différents types de petits barrages, aucun d'eux n'étant ausculté. Nous avons réparti ces ouvrages en deux grandes catégories par rapport à la présence ou non de systèmes de drainage et en sous-catégories en fonction du type d'étanchéité (étanchéité interne ou masque) (Figure 92).

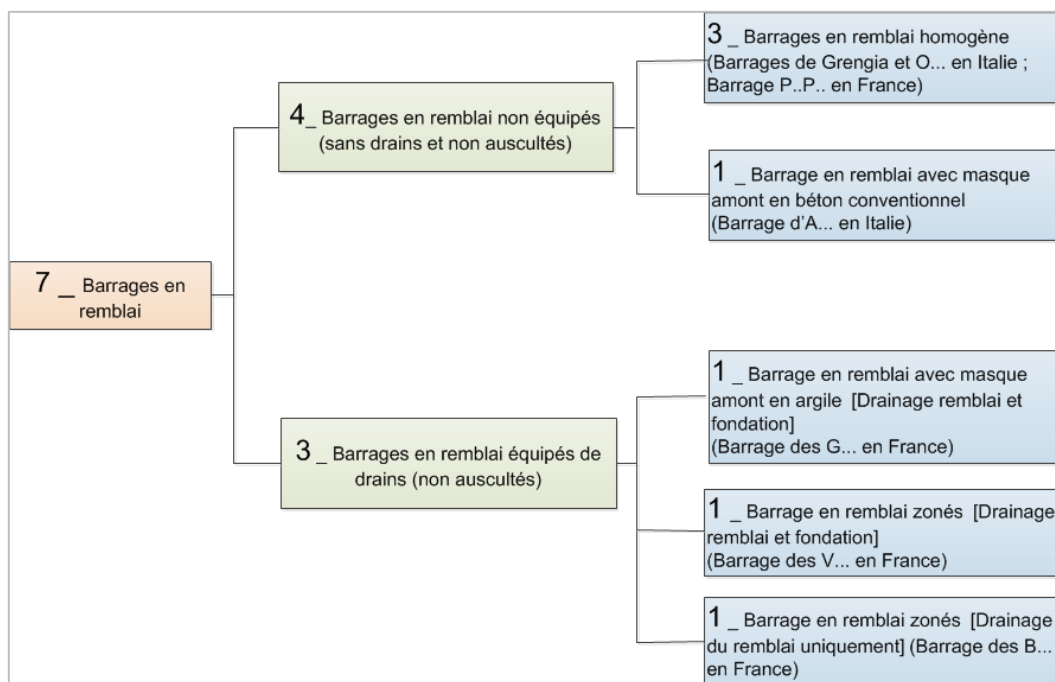


Figure 92. Les différentes applications réalisées sur des petits barrages

L'évaluation de la performance vis-à-vis de l'érosion interne implique trois fonctions : **étanchéité**, **drainage** et **résistance à l'érosion interne**. La fonction d'étanchéité présentée dans la partie 3 (partie 3, chap. 4, section 2, Figure 71) concernait les barrages en remblai homogène. D'autres indicateurs doivent être évalués dans le cas des autres types de barrages pour l'évaluation de l'étanchéité intrinsèque de l'ouvrage. Ces indicateurs d'état sont extraits de Curt (2008) et listés dans le Tableau 31. Les indicateurs d'état spécifiques à l'évaluation de la végétation arborescente restent inchangés.

**Tableau 31. Indicateurs d'état de la fonction d'étanchéité pour les autres types de barrages étudiés**

	Type de barrage	Indicateurs d'état
Fonction étanchéité du remblai	Barrage en remblai avec masque amont en béton	- Fissuration des dalles - Qualité du béton - Mouvement différentiel au niveau des joints - Intégrité des joints
	Barrage en remblai avec masque amont en argile	- Glissement du talus amont - Perméabilité du matériau du masque - Fissures de retrait, dessiccation
	Barrage en remblai zoné	- Perméabilité du matériau du noyau - Gradient hydraulique - Côte d'arase supérieure du noyau par rapport aux plus hautes eaux (PHE)

Quel que soit le type de barrage, l'étanchéité intrinsèque de la fondation est évaluée par l'indicateur d'état « *Perméabilité de la fondation* ». Cet indicateur est noté à dire d'expert.

Pour les ouvrages en remblai équipés de systèmes de drainage, les indicateurs d'état directs « *Fuites, indices de fuites* » et / ou « *Zone humide en zone de pied aval* » (dans le cas du composant fondation) permettent l'évaluation de la fonction drainage du remblai et de la fondation. Dans le cas où les indicateurs d'état directs ne sont pas activés, la fonction **drainage** du remblai et de la fondation est évaluée à l'aide des indicateurs d'état suivants :

- état visuel de l'exutoire du tapis drainant (Curt, 2008) ;
- état visuel du collecteur de drainage et / ou de la canalisation d'évacuation (Curt, 2008) ;
- état visuel de l'environnement de l'exutoire du tapis drainant (relatif à la densité de végétation arborescente présente au niveau de cet exutoire) ;
- Zone humide loin du pied aval (uniquement pour la fondation) (Curt, 2008).

Pour l'ensemble des types de barrages, la fonction de **résistance à l'érosion interne** est évaluée à l'aide de l'indicateur d'état « *Sensibilité à l'érosion interne pour la retenue au niveau normal des eaux* ».

La notation des indicateurs d'état pour l'évaluation de la performance des trois barrages italiens (Grenzia, O... et A...) a été réalisée par trois ingénieurs experts : deux ingénieurs italiens (identifiés indistinctement comme « experts 1 » et un ingénieur français (identifié « expert 2 »). Lors des notations individuelles, les deux experts italiens ont noté les indicateurs d'état de manière consensuelle. Pour les barrages français, deux ingénieurs (1 ingénieur expert et 1 ingénieur « junior ») ont réalisé les évaluations. Les notations sont ensuite assemblées par consensus, dans une note unique pour chacun des indicateurs.

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de l'évaluation du barrage de Grenzia en Italie, puis une synthèse des résultats obtenus pour les autres barrages évalués et enfin une discussion est menée autour des résultats obtenus. L'ANNEXE 6 présente un bref descriptif des autres barrages évalués ainsi que les résultats détaillés.

## 1. Evaluation du barrage de Grengia (Italie)

### 1.1. Description du barrage

Le barrage de Grengia est situé à une altitude d'environ 480 m dans la région de Cunéo. Il a été construit en 1971 et a une double fonction : d'une part, il permet l'irrigation des cultures de kiwis et de pêcheurs situées en aval et d'autre part, il permet la pratique de la pêche sportive.

Ce barrage en remblai est de type homogène et a été réalisé en déblai-remblai. Il ne possède aucun système de drainage. Il a une hauteur d'environ 10 m pour une capacité maximale avoisinant les 30 000 m<sup>3</sup>. L'ouvrage a été équipé en 2005 de piézomètres et de bornes topographiques. Cependant, ces instruments d'auscultation n'étant pas relevés, nous considérons ce barrage comme non équipé. En 2012, des essais géotechniques visant à statuer sur la stabilité de l'ouvrage ont été réalisés. Deux sondages carottés, ainsi que deux essais pénétrométriques SPT ont permis de connaître respectivement la constitution stratigraphique du remblai et de la fondation ainsi que ses principales caractéristiques géotechniques.

Une végétation arborescente est présente sur le bord aval du couronnement de l'ouvrage (Figure 93).



**Figure 93. Répartition homogène des arbres sur le couronnement aval du barrage de Grengia, Italie**  
(photo : Mériaux P., 2014)

Différentes essences d'arbres matures bordent ce couronnement. Nous y rencontrons des conifères (pin, épicéa...) et un feuillu (chêne). Sur certains profils, des souches sont présentes (toujours sur le couronnement aval de l'ouvrage). Les propriétaires témoignent de coupes d'arbres effectuées en 2004.

### 1.2. Evaluation des indicateurs d'état

Après avoir pris connaissance de l'ensemble des informations disponibles à travers le dossier d'ouvrage et des renseignements apportés par le propriétaire, un profil, à la fois représentatif de l'ouvrage et intéressant vis-à-vis du diagnostic de la végétation arborescente, a été choisi par le groupe d'experts vers le point le plus haut du barrage (Figure 94).





**Figure 94. Profil choisi par le groupe d'experts pour l'évaluation de la performance du barrage de Grengia (Italie) vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne – (photo : Bambara G., 2014)**

Sur ce profil de 5 m de largeur rive à rive, la crête a une largeur de 10 m. Le talus aval présente une rupture de pente : 80% en haut, puis 70% en aval.

La végétation arborée sur le couronnement aval du profil est abondante : entre 2 et 5 individus par 10 m<sup>2</sup>. On y retrouve 3 individus vivants : 3 conifères et 2 individus morts (conifères) et 1 ayant rejeté (feuillu) après coupe en 2004. Le diamètre des individus est supérieur à 30 cm.

Afin d'illustrer l'évaluation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente, nous présentons les notations réalisées sur **les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité du remblai** de l'ouvrage (Tableau 32). En fonction des informations disponibles, certains de ces indicateurs ne peuvent pas être évalués par les experts et, le cas échéant, sont notés « non renseigné (NR) ». Le Tableau 32 présente les notes de l'ensemble des indicateurs d'état données par les experts de manière individuelle et consensuelle afin d'évaluer la performance du composant remblai du barrage de Grengia vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne. L'ANNEXE 7 donne les notes des indicateurs d'état permettant d'évaluer la performance des autres composants (fondation et interface remblai-fondation).

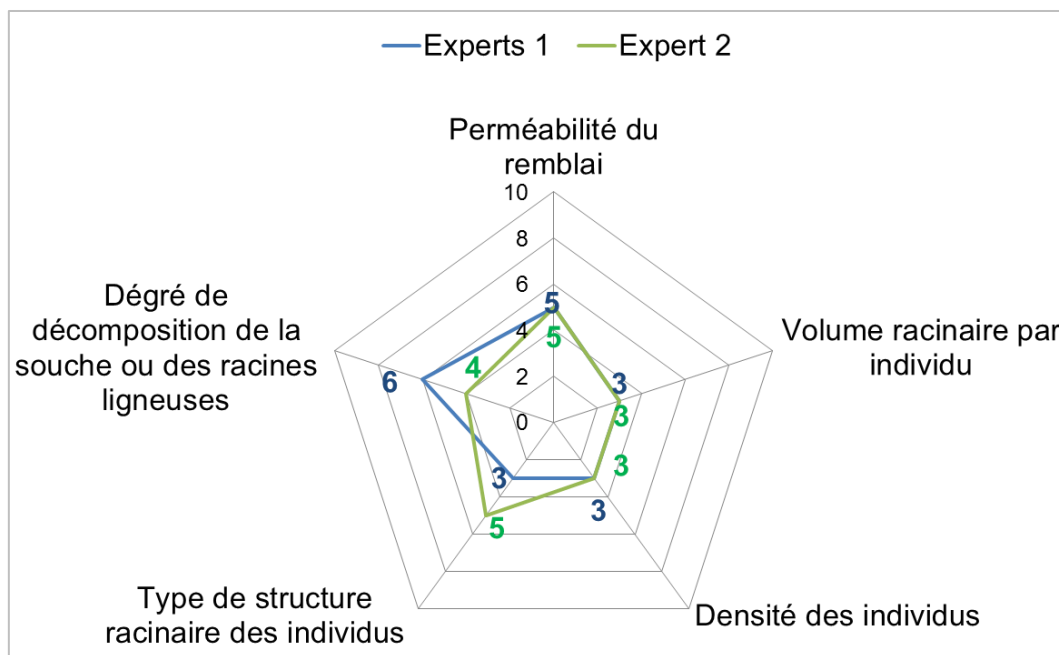


**Tableau 32. Notation des indicateurs d'état pour l'évaluation de la performance du composant « remblai » du barrage de Grengia (NR : Non Renseigné)**

Composant	Fonctions	Indicateurs d'état	Notes experts 1	Notes expert 2	Notes consensuelles
<b>Remblai (zone 2 de l'ouvrage)</b>	Etanchéité du remblai	<b>Fuites ou indices de fuites</b>	10	10	10
		Perméabilité du remblai	5	5	5
		Densité des individus	3	3	3
		Volume racinaire par individu	3	3	3
		Type de structure racinaire par individu	3	5	5
		Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu	6	4	5
	Résistance à l'érosion interne du remblai	<b>Fontis - cône d'affaissement</b>	10	10	10
		<b>Tassement différentiels</b>	NR	NR	NR
		<b>Fuites localisées et chargées</b>	10	10	10
		Sensibilité du remblai à l'érosion interne pour la retenue à niveau normal des eaux	4	4	4

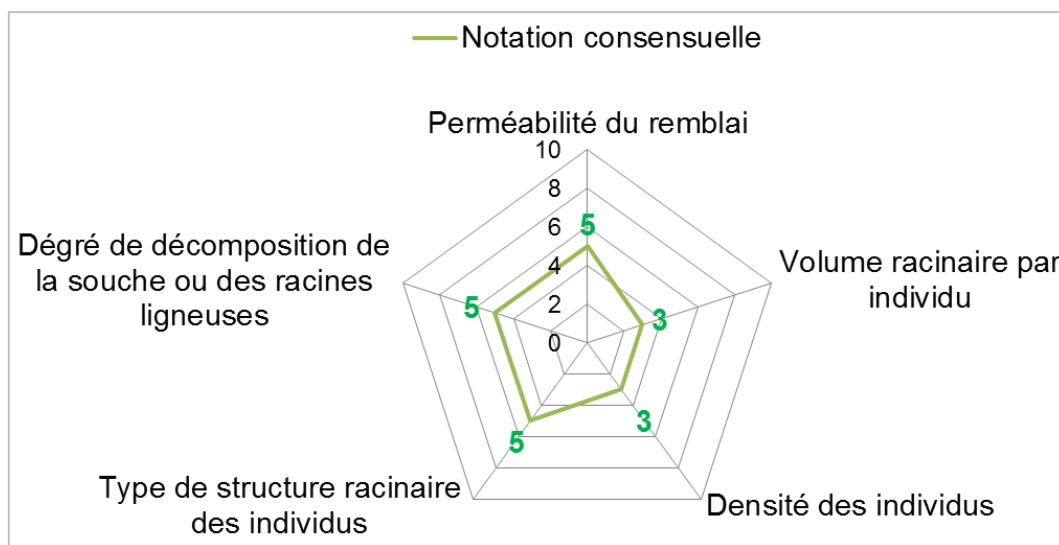
Aucune fuite ou indice de fuite n'a été observé sur le remblai sensu stricto, les experts ont donc noté les autres indicateurs d'état permettant l'évaluation de la performance de la fonction **étanchéité**.

Le diagramme radar présenté en Figure 95 illustre les résultats de la notation individuelle des indicateurs d'état par les experts.



**Figure 95. Evaluation individuelle par les experts des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité du barrage de Grengia**

Le diagramme radar (Figure 96) illustre les résultats de la notation consensuelle des indicateurs par les experts.



**Figure 96. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage de Grengia**

La notation individuelle ou par consensus de la perméabilité intrinsèque du remblai est la même pour les experts 1 et l'expert 2 : note de 5, soit une perméabilité intrinsèque médiocre. Deux indicateurs présentent les mêmes notes en individuel et par consensus : « *Densité des individus* » et « *Volume racinaire par individu* ».

Le profil choisi présente entre 2 et 5 individus par 10 m<sup>2</sup> (Figure 94).

L'indicateur d'état « *Densité des individus* » a par conséquent été évalué comme mauvais (note égale à 3) conformément aux références établies lors de la formalisation de cet indicateur que ce soit lors de la notation individuelle ou consensuelle.

Pour évaluer l'indicateur d'état « *Volume racinaire par individu* », le groupe d'experts a mesuré le diamètre au collet des plus gros individus. Ce dernier étant supérieur à 30 cm, l'indicateur a été évalué comme mauvais (note égale à 3) quel que soit le type de notation (individuelle ou consensuelle).

Pour ces deux indicateurs d'état, les grilles de formalisation établies permettent une évaluation reproductible par différents utilisateurs.

L'indicateur d'état « *Type de structure racinaire des individus* » a été évalué par le groupe d'experts à partir de la clef d'aide à l'identification de la structure racinaire potentielle d'un individu basée sur des paramètres déterminant la structure racinaire d'un arbre (type de sol, accès à l'eau). Compte tenu de ces paramètres, la végétation arborescente du barrage de Grengia présente potentiellement une structure racinaire mixte (racines horizontales et pivots). Lors de la notation individuelle, les résultats diffèrent entre les experts 1 (note de 3) et l'expert 2 (note de 5). En effet, la description des références de cet indicateur est difficile à réaliser et des améliorations doivent encore être produites pour permettre à l'expert d'estimer la structure racinaire d'un individu. Par prudence, la discussion consensuelle entre les experts les amène à évaluer l'indicateur d'état « *Type de structure racinaire des individus* » comme étant médiocre (note égale à 5) car conformément aux références établies lors de la formalisation de cet indicateur, ils supposent une structure racinaire mixte.

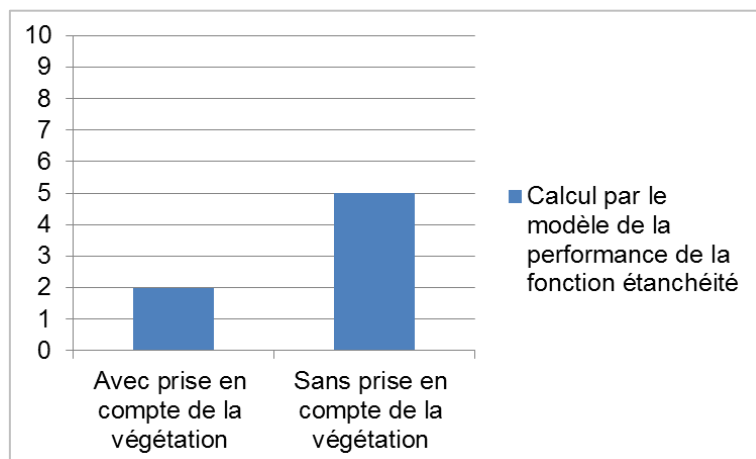
Enfin, la note de 5 (médiocre) pour l'indicateur « *Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu* » a été attribuée de façon consensuelle par les experts sur la base des éléments fournis dans la grille de formalisation, compte tenu de l'état de dégradation de la souche de conifère (Figure 97 a) et des rejets observés sur la souche de chêne (Figure 97 b). Lors de la notation individuelle des experts, des résultats différents ont été donnés (Figure 95). En effet, la coupe des arbres qui date d'une dizaine d'années ne permet pas aux experts de se baser sur les connaissances dont nous disposons actuellement (évolution de la décomposition des racines jusqu'à 4 années de vieillissement pour les conifères et 6 années de vieillissement pour les feuillus). Cependant, au vu du bon état général des souches de conifères et du rejet important de la souche issu d'un feuillu qui démontre qu'elle n'est pas totalement morte, l'extrapolation qui a été faite par l'expert 2 (spécialisé en barrages et en végétation) reste proche de la note donnée dans les références établies de l'indicateur d'état « *Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu* ». Ainsi, pour les racines ligneuses de conifères de milieu montagnard coupés depuis 4 années, les références donnent une note passable (6-7), l'expert 2 a quant à lui extrapolé globalement une note médiocre (4) pour ce profil. La grille de formalisation actuelle va être complétée dans les prochaines années pour prendre en compte des durées plus longues de décomposition.



Figure 97. Souche de conifère morte (a) et souche de chêne ayant rejeté (b) sur le couronnement aval du barrage de Grengia, Italie (photo : Bambara G., 2014)

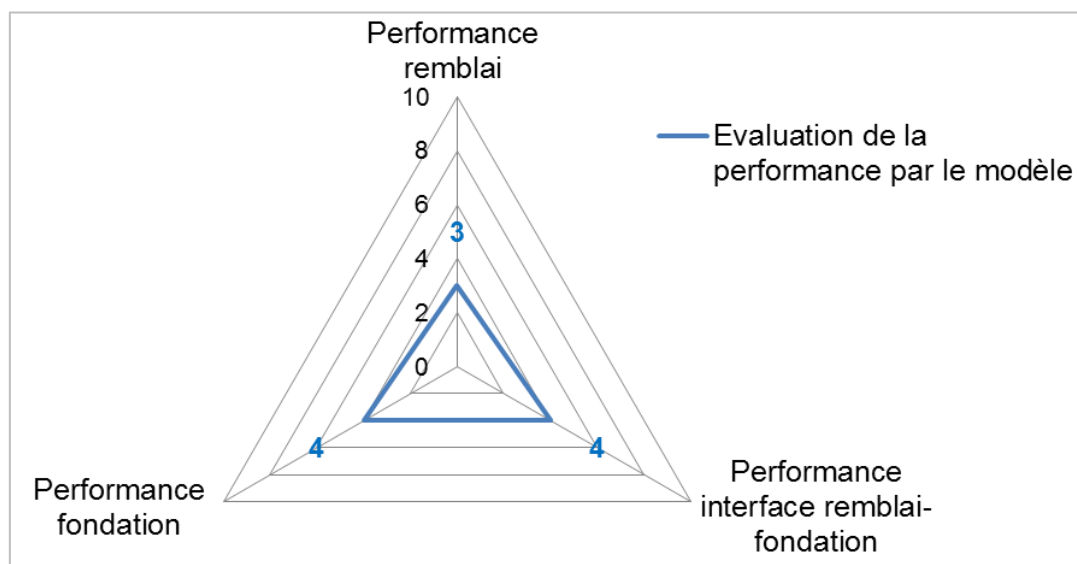
### 1.3. Evaluation de la performance des fonctions et de la performance des composants de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne

La performance de la fonction **étanchéité** du remblai a été calculée par le modèle en considérant, d'une part, les indicateurs relatifs à la végétation dans son état actuel (note obtenue : 2), d'autre part, sans considérer la présence de la végétation, en imaginant le barrage comme n'ayant jamais eu d'arbres (note obtenue : 5) (Figure 98). Nous pouvons en conclure que la présence de végétation dégrade de façon non négligeable la performance de cette fonction.



**Figure 98. Evaluation par le modèle de la performance de la fonction étanchéité du remblai avec et sans prise en compte de la végétation**

Nous présentons sur la Figure 99, les évaluations de la performance du remblai, de l'interface remblai-fondation et de la fondation meuble vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne obtenues par le modèle.



**Figure 99. Evaluation par le modèle de la performance des composants du barrage de Grengia vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne**

Nous relevons que les notes de performance obtenues par le modèle reflètent l'opinion des experts sur la sécurité de cet ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne.

Finalement, le modèle indique une performance mauvaise à médiocre.

Le composant remblai du barrage a une performance plus défavorable que l'interface et la fondation :

- mauvaise étanchéité due aux caractéristiques intrinsèques du barrage et à la présence de grands arbres dont certains ont été coupés, ce qui laisse présager la présence de racines décomposées et donc de chemins préférentiels pour l'eau ;
- performance médiocre de la fonction de **résistance à l'érosion interne** résultant d'une évaluation médiocre de l'indicateur « *Sensibilité du remblai à l'érosion interne* » (résultant elle-même de la forte pente du talus aval). Dans le cas où la végétation arborescente n'aurait pas été prise en compte, le composant remblai aurait eu une performance médiocre au même titre que la fondation et l'interface remblai-fondation.

Pour la fondation, la performance médiocre résulte :

- de la note de 4 attribuée à l'indicateur « *Sensibilité de la fondation à l'érosion interne* » du fait d'un gradient admissible (calculé par les experts à partir de la géométrie et de la résistance à l'érosion du matériau) évalué « médiocre » ;
- de la performance « médiocre » de la fonction étanchéité du fait de la « *Fuite d'eau claire* » observée par les experts lors de l'évaluation des indicateurs. En effet, la présence de fuites d'eau claire est un indicateur direct permettant d'obtenir directement l'évaluation de la performance de la fonction d'étanchéité. Si une fuite est présente, la performance de la fonction étanchéité sera au mieux médiocre selon la grille de formalisation établie de l'indicateur d'état « *Fuite d'eau claire* ». C'est le cas pour le barrage que nous évaluons étant donné que la fuite d'eau claire n'est pas importante.

Pour l'interface remblai – fondation, la performance médiocre (note obtenue de 4) s'explique de la même manière que pour la fondation. Ces résultats permettent de cibler les principaux points faibles de l'ouvrage qu'il est nécessaire de traiter et d'aller vers la proposition d'actions correctives comme par exemple un traitement de la végétation (extraction des arbres et des souches, apport de matériaux et retalutage).

## 2. Synthèse et discussion des résultats obtenus

Cette partie synthétise sous forme de tableaux les résultats obtenus pour les autres applications réalisées dans le cadre du projet RISBA (Figure 92). Nous rappelons que l'ANNEXE 6 fournit un bref descriptif de chaque barrage.

Un tableau par composant est présenté : remblai (Tableau 33), fondation (Tableau 34) et interface remblai-fondation (Tableau 35). Nous donnons :

- La dénomination du barrage évalué ;
- La partie de l'ouvrage concernée par la présence de végétation arborescente pour l'évaluation du remblai de l'ouvrage (Figure 55). NB : pour l'évaluation de la fondation ou de l'interface, nous nous trouvons forcément en zone 4. S'il n'y a pas de végétation, l'indicateur d'état « *Densité des individus* » est égal à 10 ;
- La performance des différentes fonctions évaluées par le modèle en considérant la présence de végétation, puis sans la considérer (pour les fonctions **étanchéité** et **drainage**) ;
- La performance du composant vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne en considérant la présence de végétation arborescente, puis sans la considérer.

Cette démarche permet de comparer l'influence de la présence de végétation arborescente sur l'évaluation de la performance de chaque composant de l'ouvrage. La végétation arborescente vient en

effet dégrader l'évaluation de la performance de chacun des composants comme nous pouvons par exemple l'observer lors de l'évaluation de la performance du remblai du barrage Français des G... qui passe d'une bonne performance (score de 8) sans prise en compte de la végétation arborescente à une mauvaise performance (score de 3) avec la prise en compte de la végétation (Tableau 33). Par contre, dans le cas du barrage italien d'A..., nous n'observons pas de différences entre les résultats de performance avec ou sans prise en compte de la végétation. Pour ce barrage équipé d'un dispositif d'étanchéité par masque amont en béton conventionnel, la bonne performance de la fonction de *résistance à l'érosion interne* (score de 9) donne une bonne performance du composant remblai. Le poids du résultat de la performance de la fonction de **résistance à l'érosion interne** est plus élevée que celui de la fonction **d'étanchéité** ce qui permet d'obtenir une bonne performance du composant remblai (score de 9) suite à leurs combinaisons (Tableau 33) : les très bonnes caractéristiques de résistance à l'érosion interne contrecarrent l'apparition de ce phénomène même en cas d'une augmentation potentielle d'eau dans l'ouvrage du fait de la présence d'arbres. Pour les autres barrages qui ne possèdent pas de dispositif d'étanchéité et où la performance de la fonction de **résistance à l'érosion interne** est au maximum passable, l'influence de la présence de végétation arborescente sur le résultat de performance du composant considéré n'est pas négligeable.

A la suite de ces applications, une restitution des résultats a été réalisée avec le groupe d'experts. La formalisation de quatre indicateurs d'état a dû être améliorée.

Pour deux de ces indicateurs, les écarts entre les notes des différents ingénieurs étaient trop importants d'une part du fait de la difficulté de certains des ingénieurs à utiliser la grille formalisation correspondante ou à cause de l'absence de données. Une meilleure définition a dans ce cas été donnée : c'est le cas de l'indicateur d'état « *Sensibilité à l'érosion interne pour la retenue au niveau normal des eaux* » permettant d'évaluer la performance de la fonction **résistance à l'érosion interne** et de l'indicateur d'état spécifique à la végétation arborescente « *Type de structure racinaire par individu* » permettant d'évaluer la performance de la fonction **étanchéité**. D'autre part, les données relatives à certains indicateurs d'état n'étaient pas disponibles, ce qui ne permettait pas d'utiliser le modèle. Ainsi, les indicateurs d'état préalablement établis : « *Perméabilité du matériau* », « *Compactage* » et « *Granulométrie* » ont été remplacés par un indicateur d'état unique : « *Perméabilité du remblai* » ce dernier permet à présent d'utiliser les données relatives à la perméabilité du matériau, au compactage ou à la granulométrie sans être pénalisé par l'indisponibilité d'une de ces données.

Les références de l'indicateur d'état direct « *Fuite d'eau claire* » ont été modifiées afin d'être moins pénalisantes selon l'état de la fuite observée. Cette modification a notamment été réalisée suite à l'évaluation du barrage de Grengia où une note de 3 (mauvaise) aurait été trop pénalisante. Si la présence de fuites est avérée, la note pourra être au mieux de 5 soit une évaluation médiocre.

**Tableau 33. Synthèse des résultats d'évaluation de la performance des fonctions et du composant « remblai » des barrages avec ou sans prise en compte de la végétation arborescente**

Composant	Dénomination du barrage	Zone évalué avec présence de végétation	Perf. étanchéité (végétation)	Perf. étanchéité (sans végétation)	Perf. drainage (végétation)	Perf. drainage (sans végétation)	Perf. de résistance à l'érosion interne	Perf. remblai (végétation)	Perf. remblai (sans végétation)
Remblai	Barrage d'O... – Italie	Parties 4 voire 3	2	7	/	/	4	3	5
	Barrage d'A... – Italie	Parties 2 et 3	4	8	/	/	9	9	9
	Barrage des G... - France	Parties 2 et 3	4	8	3	8	4	3	8
	Barrage de P..P.. – France	Parties 1 voire 2	3	8	/	/	6	3	8
	Barrage des B... – France	Parties 3 et 4	5	7	7	8	5	5	8
	Barrage des V... – France	Non évaluable par le modèle (informations insuffisantes) mais évaluation de la végétation sur deux profils P1 (zone 2 et 3) et P2 (zone 4)							

**Tableau 34. Synthèse des résultats d'évaluation de la performance des fonctions et du composant « fondation » des barrages avec ou sans prise en compte de la végétation arborescente**

Composant	Nom du barrage	Type de barrage	Perf. étanchéité (végétation)	Perf. étanchéité (sans végétation)	Perf. drainage (végétation)	Perf. drainage (sans végétation)	Perf. de résistance à l'érosion interne	Perf. remblai (végétation)	Perf. remblai (sans végétation)	
Fondation	Barrage d'O... – Italie	Remblai homogène sans drains ni instruments d'auscultation	2	6	/	/	4	3	4	
	Barrage d'A... – Italie	Remblai avec masque amont en béton sans drains ni instruments d'auscultation	9	/	/	/	9	10	/	
	Barrage des G... - France	Remblai avec masque amont en argile drainé mais sans instruments d'auscultation	/	6	/	8	4	/	8	
	Barrage de P..P... – France	Remblai homogène sans drains ni instruments d'auscultation	Non évaluable par le modèle (informations insuffisantes)							
	Barrage des B... – France	Remblai zoné drainé (que le remblai) mais sans instruments d'auscultation	3	4	/	/	/	/	/	
	Barrage des V... – France	Remblai zoné drainé mais sans instruments d'auscultation	Non évaluable par le modèle (informations insuffisantes)							



**Tableau 35. Synthèse des résultats d'évaluation de la performance des fonctions et du composant « interface remblai-fondation » des barrages avec ou sans prise en compte de la végétation arborescente**

Composant	Nom du barrage	Type de barrage	Perf. étanchéité (végétation)	Perf. étanchéité (sans végétation)	Perf. drainage (végétation)	Perf. drainage (sans végétation)	Perf. de résistance à l'érosion de contact	Perf. remblai (végétation)	Perf. remblai (sans végétation)
Interface remblai-fondation	Barrage d'O... – Italie	Remblai homogène sans drains ni instruments d'auscultation	2	6	/	/	3	2	3
	Barrage d'A... – Italie	Remblai avec masque amont en béton sans drains ni instruments d'auscultation	4	8	/	/	9	9	9
	Barrage des G... – France	Remblai avec masque amont en argile drainé mais sans instruments d'auscultation	Pas d'évaluation de l'interface remblai-fondation car barrage drainé en remblai et en fondation						
	Barrage de P.P... – France	Remblai homogène sans drains ni instruments d'auscultation	Non évaluable par le modèle (informations insuffisantes)						
	Barrage des B... – France	Remblai zoné drainé (que le remblai) mais sans instruments d'auscultation	3	4	/	/	3 (à dire d'expert)	3	3
	Barrage des V... – France	Remblai zoné drainé mais sans instruments d'auscultation	Pas d'évaluation de l'interface remblai-fondation car barrage drainé en remblai et en fondation						

### **Chapitre 3. Synthèse**

La prise en compte de l'élément « végétation arborescente » dans les modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne et affouillement permet une amélioration des modèles existants. Elle vient dégrader l'évaluation de la performance de l'ouvrage. La prise en compte de la végétation arborescente dans les modèles permet donc de mieux représenter la réalité de ces ouvrages concernés par la présence de végétation et donc d'être plus sécuritaire vis-à-vis du risque lié aux mécanismes initiés ou aggravés par celle-ci.

La robustesse de ces modèles a été vérifiée par le fait qu'ils sont capables de reproduire le raisonnement d'un expert. La procédure que nous avons suivie lors des applications nous permet de justifier ce point car il a été demandé aux experts de donner une note globale pour chaque critère fonctionnel ou fonction et pour l'indicateur de performance global (pour les digues) ou de chaque composant (pour les barrages) sans utilisation du modèle d'évaluation de la performance. La comparaison des résultats obtenus avec et sans utilisation du modèle sont quasiment comparables.

Les évaluateurs qui ont pu réaliser la notation des différents indicateurs d'état lors des applications ont montré un vif intérêt à cette méthode. L'utilisation de la grille de formalisation pour la notation de chacun des indicateurs d'état leur a été explicitée avant le début de l'évaluation et ils ont pu facilement s'approprier cet outil.

D'autre part, l'application des modèles sur des ouvrages réels a permis de :

- vérifier que l'utilisation des indicateurs d'état à évaluer était répétable et reproductible, cette propriété est renforcée par le fait que plusieurs des évaluateurs n'étaient pas familiers avec ce type de méthode d'évaluation ;
- vérifier les formalisations des agrégations des indicateurs d'état pour l'obtention de la performance de chaque fonction (barrages) ou critère fonctionnel (digues). Le résultat obtenu par le modèle doit correspondre à l'avis de l'expert.

Les modifications nécessaires ont ensuite été réalisées lors de séances de restitution auprès du groupe d'experts : une séance suite aux applications menées sur les barrages et une séance suite aux applications menées sur les digues. D'autres applications sont encore nécessaires afin de calibrer et valider les modèles développés.



# Partie 5

## Apports de la thèse et perspectives

*Chapitre 1. Apports de la thèse*

*Chapitre 2. Perspectives de la thèse*



## **Chapitre 1. Apports de la thèse**

Ce chapitre permet de synthétiser notre contribution pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai tant au niveau méthodologique qu'opérationnel.

### **1. Apports méthodologiques**

Ces travaux de thèse ont amélioré les modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques existants (Curt, 2008; Vuillet, 2012) afin de disposer de modèles complets et robustes prenant en compte la présence de végétation arborescente. Les ouvrages considérés sont les ouvrages à charge temporaire et permanente. Plus précisément, les travaux ont abouti à :

- développer une mesure indirecte d'estimation et de classification des différents stades de décomposition des racines ligneuses ;
- décrire l'ensemble des données nécessaires à l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne (digues et barrages) et affouillement (digues) sous la forme d'indicateurs d'état formalisés ;
- identifier et formaliser des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente nécessaires pour évaluer la performance d'ouvrages hydrauliques boisés plus ou moins densément ;
- disposer de modèles quantitatifs d'évaluation de la performance par agrégation des indicateurs d'état et des critères fonctionnels ou performance des fonctions ;
- mettre en place une procédure de validation de la démarche et des résultats.

Notre travail a également pour conséquence la pérennisation et la transmission des connaissances. En effet, l'intérêt de la formalisation des indicateurs d'état est de rassembler un certain nombre de connaissances existantes et de fixer un vocabulaire commun et accepté de manière consensuelle par les experts. Des ingénieurs avec des niveaux d'expériences différentes ont participé aux évaluations de terrain. Nous avons constaté au cours des différentes applications que l'ensemble des participants s'adaptait facilement à la méthode. Nous pensons que ce type d'outil facilite la transmission de connaissances et le partage du vocabulaire au sein d'un groupe d'experts.

Deux types de méthodologies ont été déployés :

- **Une méthodologie qui s'appuie sur des dispositifs expérimentaux** où sont enterrés des échantillons de racines en décomposition. L'analyse de ces échantillons par SPIR apporte de la connaissance sur l'évolution de la décomposition des racines implantées dans les ouvrages hydrauliques ;
- **Une méthodologie basée sur le recueil et la formalisation de connaissances** auprès d'un groupe d'ingénieurs experts et ce, afin d'identifier, formaliser et agréger dans des modèles les données nécessaires à l'évaluation de la performance d'un ouvrage hydraulique vis-à-vis des mécanismes de détérioration considérés. Au cours de ces travaux de thèse, **quatorze séances d'expertise** d'environ trois heures chacune, soit quarante-deux heures, ont été nécessaires pour l'obtention des modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne (digues et barrages) et affouillement (digues) :
  - **Trois séances** ont été dédiées à l'identification de l'ensemble des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente ;
  - **Cinq séances** ont permis de développer le modèle d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire vis-à-vis de l'érosion interne ;
  - **Trois séances** ont été nécessaires pour l'obtention des modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge permanente vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne ;

- Trois séances ont servi à développer le modèle d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire vis-à-vis du mécanisme de détérioration par affouillement.

Le temps passé au cours de ces séances n'est que la partie visible de l'iceberg. N'y figure pas le temps passé à la préparation des séances de recueils et aux formalisations post-séances qui ne concernent principalement que la personne chargée du recueil. De même, n'est pas compté le temps passé lors des différentes étapes de validation qui ont mobilisé l'un ou l'ensemble des ingénieurs experts pour les tests sur dossiers et les applications de terrain. La proportion de temps passé sur chaque tâche n'est pas uniforme. Ces différences proviennent des avancées préexistantes sur chacune ces tâches.

## 1.1. Apports méthodologiques sur la mesure

### 1.1.1. Mesures indirectes

L'état de décomposition de racines ligneuses implantées dans les ouvrages hydrauliques en remblai est une information non accessible mais nécessaire lorsque l'on souhaite évaluer le risque engendré par le mécanisme de détérioration par érosion interne sur l'un de ces ouvrages soumis à la présence de végétation arborescente. Les travaux engagés dans cette thèse ont **apporté des connaissances nouvelles sur la caractérisation de la vitesse de décomposition des racines ligneuses en fonction de l'espèce d'arbre, du diamètre de la racine considérée et des conditions environnementales et climatiques.**

A partir des travaux existants (Zanetti, 2010) et des protocoles que nous avons développés, **une procédure de suivi de la décomposition racinaire** à partir de dispositifs expérimentaux in situ a été établie. Elle passe par :

- une **méthodologie d'évaluation qualitative** de la décomposition des racines ligneuses in situ ;
- une **méthodologie d'évaluation quantitative** de la décomposition des racines ligneuses en laboratoire.

Pour ce dernier point, deux mesures sont réalisées : une mesure de perte de densité sèche des échantillons de racines ligneuses au cours de leur décomposition à l'aide de la méthode par déplacement d'eau, et une mesure de l'évolution chimique de ces mêmes échantillons par spectrométrie proche infrarouge.

Le traitement chimiométrique des données SPIR nous permet de discriminer des classes en fonction des différents stades de décomposition et des différentes espèces concernés depuis le début de l'étude.

De plus, les modèles de régression PLS développés prédisent correctement, pour un échantillon inconnu, son stade de décomposition et son espèce. Dans tous les cas, l'échantillon inconnu doit à l'heure actuelle correspondre à une classe à laquelle appartiennent les échantillons présents dans la base de données constituée.

Ces mesures indirectes pour la caractérisation de l'état de décomposition des racines ligneuses, nous ont servi à formaliser l'indicateur d'état « *Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu* ».

### *1.1.2. Identification et formalisation d'indicateurs d'état*

Les apports méthodologiques sur la mesure passent également par l'identification des indicateurs d'état et leur formalisation. Nos travaux débouchent sur trois principales avancées vis-à-vis de cette problématique :

- l'identification et la formalisation d'indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente ;
- la formalisation des indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne et affouillement qui rend la mesure répétable et reproductible ;
- l'amélioration et l'adaptation des indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge permanente vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne pour tenir compte des niveaux variables d'auscultation et d'équipements (dispositifs d'étanchéité et drainage).

La phase de validation des modèles d'évaluation de la performance à l'aide de cas tests et de cas réels nous a aidés à tester la cohérence des formalisations et des agrégations des indicateurs d'état. En cas de problème, des améliorations ont été réalisées afin de s'approcher au plus près du raisonnement du groupe experts avec lequel nous travaillions.

## *1.2. Apports méthodologiques sur les modèles d'évaluation de la performance*

En fonction des systèmes de génie civil étudiés (digues ou barrages) et des mécanismes de détérioration analysés (érosion interne ou affouillement), nos apports méthodologiques ont visé à rendre les modèles d'évaluation de la performance :

- plus robustes, par l'établissement des formalisations pour l'agrégation des indicateurs d'état servant à évaluer chaque critère fonctionnel dans le cas des ouvrages hydrauliques à charge temporaire et ce, pour les deux types de mécanismes de détérioration étudiés : l'érosion interne et l'affouillement ;
- polyvalents, par le développement d'une approche modulaire débouchant sur un modèle d'évaluation de la performance pour des ouvrages hydrauliques à charge permanente aux caractéristiques différentes (types d'étanchéité, présence ou absence de dispositifs de drainage et d'auscultation) vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne. De plus, l'implication de différents types d'indicateurs utilisés auparavant dans des modèles différents (conformité aux règles de l'art ; performance) Curt (2008)) nous permettent de contourner le manque ou l'absence de certaines données nécessaires à l'évaluation de la performance d'une fonction (par exemple l'absence de données d'auscultation pour l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité).

L'application de ces modèles sur des cas tests et réels a démontré leur robustesse notamment par le fait qu'ils sont capables de reproduire le raisonnement d'un ingénieur expert.

## **2. Apports opérationnels**

L'objectif de cette thèse était de développer des méthodes et outils prenant en compte la présence de végétation arborescente sur ou aux abords des ouvrages hydrauliques pour une future mise à disposition des gestionnaires. Pour ce faire, une analyse de l'impact de la végétation arborescente sur les ouvrages hydrauliques en remblai a été menée, puis une adaptation et une amélioration des modèles d'évaluation de la performance des barrages et des digues existants ont été réalisées. L'ensemble de nos travaux présente une vocation applicative forte et a été mené en considérant les pratiques de la profession.



## *2.1. Apports opérationnels des mesures liées à la présence de la végétation arborescente sur les ouvrages hydrauliques*

Le principal avantage des mesures caractérisant la végétation arborescente sur les ouvrages hydrauliques est qu'elles permettent d'établir un diagnostic rapide de l'impact de cette végétation vis-à-vis du mécanisme de détérioration que l'on considère (érosion interne ou affouillement). Les indicateurs d'état spécifiques sont aisément utilisables. En effet, ils sont formalisés selon une grille couvrant les champs nécessaires pour une mesure robuste. Les grilles ont été validées par des simulations et des validations en vraie grandeur. Des photos peuvent illustrer les références sur l'échelle de notation afin de clarifier les protocoles et évaluations.

Ce diagnostic rapide de la végétation arborescente apporte une base de connaissances importante en vue de la réalisation ultérieure d'un plan de gestion de la végétation.

## *2.2. Apports opérationnels des modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques*

Les modèles d'aide à l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente. Ces modèles ont été employés à deux titres :

- au titre de la recherche grâce aux tests de validation sur dossier, ce qui a permis une première validation les modèles ;
- à titre opérationnel : les modèles ont été appliqués sur trois cas réels de tronçons de digue et sept petits barrages en remblai. Ces applications ont montré l'intérêt opérationnel des modèles d'évaluation de la performance. La poursuite de leur utilisation et de leur validation est nécessaire. Comme dans le cas de l'outil Digsure (Peyras et al., 2015), que les modèles développés pour des digues fluviales viennent compléter, ils pourront être utilisés dans le cadre de l'analyse d'ouvrages : pour une étude de danger, pour une visite technique approfondie, ...

Ces modèles se sont montrés facilement appropriables et utilisables par des experts de niveaux et de compétences variables à l'aide du dossier contenant l'ensemble des indicateurs formalisés et des fiches d'évaluation des indicateurs d'état.

A noter que les modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge permanente peuvent être utilisés pour le cas des digues de canal (navigation, hydroélectricité, irrigation). A la différence des barrages qui sont évalués sur un profil, elles nécessitent d'être décomposer (au même titre que les digues de protection contre les inondations) en tronçons homogènes quant à leur constitution et à leur couverture végétale.

## **Chapitre 2. Perspectives de la thèse**

Nous présentons dans ce chapitre les perspectives en termes méthodologiques et opérationnels.

### **1. Perspectives méthodologiques**

Plusieurs perspectives méthodologiques ressortent de nos travaux.

#### **1.1. Amélioration de la formalisation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente**

A court terme, nous pouvons envisager de comparer et enrichir la formalisation de certains indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente grâce aux résultats obtenus au cours de la thèse de Benjamin Mary (2015) qui vise à détecter les systèmes racinaires à l'aide de méthodes géophysiques (Mary et al., 2013). Les indicateurs d'état concernés sont notamment : « *Volume racinaire par individu* » et « *Structure racinaire par individu* ».

Il est également nécessaire de compléter les références de la grille de formalisation de l'indicateur d'état « *Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu* ». Le suivi de la décomposition des échantillons de racines ligneuses au sein des dispositifs expérimentaux en place doit être poursuivi. De plus, il peut être envisagé de mettre en place des dispositifs expérimentaux sur d'autres sites géographiques avec des espèces ligneuses différentes.

#### **1.2. Développement de modèles d'évaluation de la performance vis-à-vis d'autres mécanismes de détérioration**

Au-delà des aspects liés à l'impact de la végétation arborescente, nous pourrions envisager de développer des modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai vis-à-vis d'autres types de mécanismes de détérioration tels que la surverse, le glissement, la liquéfaction... sur la base de l'identification et la formalisation d'indicateurs d'état pour des ouvrages hydrauliques à charge temporaire et permanente non équipés (pas dispositif d'étanchéité, ni de drainage) et non auscultés.

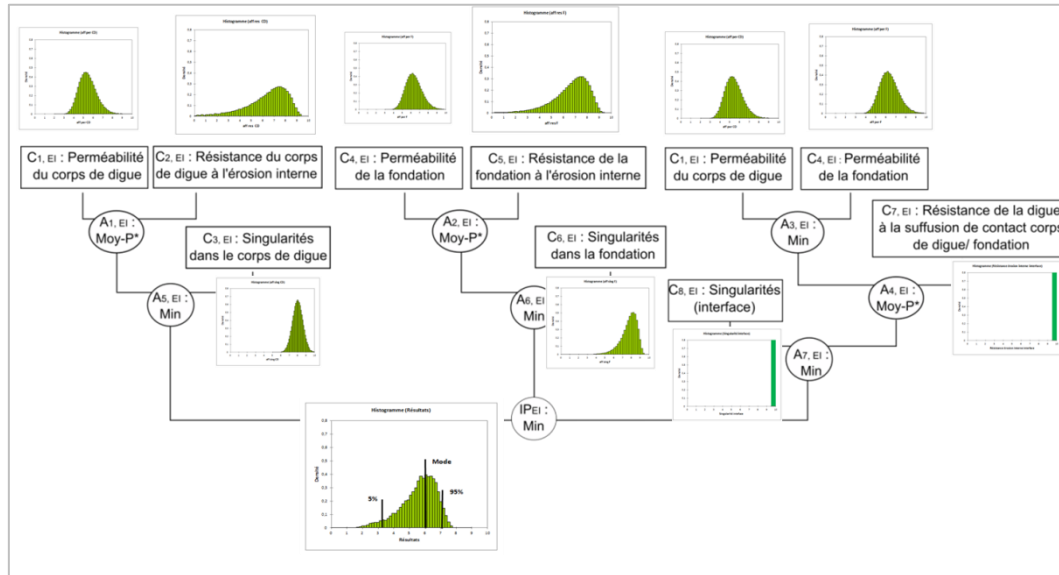
De même, le développement de ces modèles pourrait être envisagé, notamment pour les ouvrages hydrauliques à charge temporaire, sur d'autres types d'ouvrages que des digues de protection fluviale en remblai homogène : digues de protection fluviale zonées, digues de protection fluviale drainées et équipées d'instruments d'auscultation, digues maritimes, ...

#### **1.3. Amélioration des modèles par la prise en compte des imperfections**

Nous pouvons également envisager d'améliorer les modèles en intégrant les imperfections liées à l'information ainsi qu'aux incertitudes de l'évaluateur. Il paraît important de prendre en compte l'imperfection des données, qui peuvent être sujettes à une forte variabilité, dans les modèles d'évaluation de la performance. Plusieurs méthodes de prise en compte des imperfections et incertitudes sont envisageables :

- La théorie des probabilités ;
- Les probabilités subjectives ;
- La théorie des sous-ensembles flous ;
- La théorie des possibilités ;
- La théorie des masses de croyances.

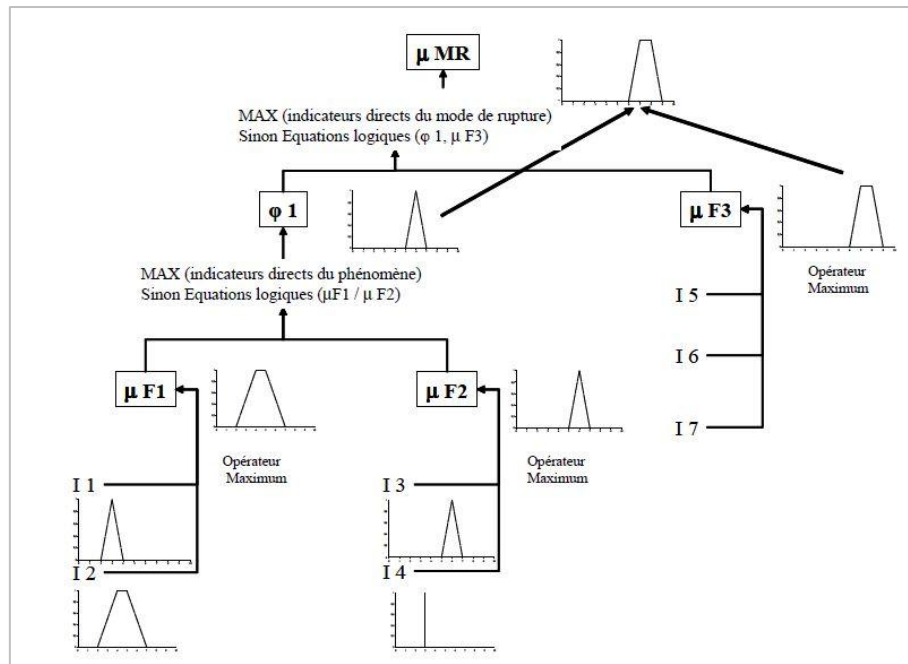
Vuillet (2012) intègre l'incertitude des données dans les critères d'évaluation des digues en utilisant les probabilités subjectives. L'expert élicite trois paramètres afin d'évaluer chaque critère : le mode et les quantiles 5% et 95%. La propagation des incertitudes est réalisée dans le modèle au moyen des simulations de Monte Carlo permettant de connaître in fine la distribution de l'indicateur de performance du tronçon de digue étudié pour le mécanisme de détérioration considéré (Figure 100).



**Figure 100. Exemple de modélisation probabiliste de l'évaluation de la performance d'un tronçon de la digue de Veynes (05, France) vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne (Vuillet, 2012)**

La représentation des imperfections liées aux données, leur propagation dans le modèle d'agrégation des indicateurs d'état, des fonctions (ou critères fonctionnels) et enfin l'expression du résultat final peuvent également être réalisés à l'aide de distributions de possibilité. Curt (2008) utilise cette approche (Figure 101). Ainsi, la méthodologie adoptée se déroule selon trois étapes qui consistent :

- à représenter les données entachées d'imperfections : il est demandé à l'expert de déclarer la distribution de possibilité correspondant à l'évaluation de chacun des indicateurs ;
- à propager les distributions de possibilité dans le modèle en tenant compte des opérateurs et règles définis par les experts pour agréger les informations ;
- à fournir l'évaluation finale qui peut être exprimée sous la forme d'une distribution de possibilité ou sous la forme d'une note précise obtenue par un procédé de défuzzification.



**Figure 101. Représentation et propagation des données imparfaites dans le modèle d'évaluation de la performance des barrages en remblai (Curt, 2008)**

#### 1.4. Amélioration des modèles d'évaluation en passant d'une tâche de diagnostic à une tâche de pronostic

L'objectif du diagnostic tel que nous le proposons dans ce mémoire est l'identification de l'état de performance de l'ouvrage hydraulique vis-à-vis d'un mécanisme de détérioration à l'instant actuel. Or, l'une des perspectives méthodologiques qu'il est intéressant de proposer à la suite de nos travaux est la réalisation d'un pronostic de l'ouvrage à échelle de temps plus ou moins grande. En soi, la démarche de pronostic est la prédiction des possibles états futurs dans lesquels un système peut évoluer. Une telle démarche a notamment été entreprise par Peyras (2003) dans le cadre de l'analyse de l'évolution de la performance d'une fonction. Il montre ainsi que différents types de lois sont susceptibles d'intéresser les mécanismes de vieillissement des barrages. Par exemple, la loi exponentielle concerne les mécanismes dont le déclenchement est long et qui s'accélèrent rapidement avant la défaillance. Typiquement, cette loi est représentative du mécanisme d'érosion interne. Différentes approches de pronostic peuvent être utilisées en fonction de l'élément que l'on cherche à pronostiquer (indicateurs d'état, fonctions, composants, ... vis-à-vis de tel ou tel mécanismes de détérioration). Le Tableau 36 extrait de la thèse de Gucik-Derigny (2011), synthétise les trois principales approches de pronostics en donnant leurs avantages et leurs inconvénients.

**Tableau 36. Avantages et inconvénients des trois grandes approches de pronostic (Gucik-Derigny, 2011)**

Approche de pronostic	Avantages	Inconvénients
Basée sur l'expérience	Connaissances disponibles dans de nombreux domaines d'expertise	Nécessite un bon retour d'expérience. Intégration simplifiée des variations de conditions opérationnelles
Guidée par les données	Connaissance des mécanismes de dégradation directement incluse dans les données	Nécessite des scénarios de dégradation pour différentes conditions opérationnelles
Fondée sur les modèles	Meilleures performances de pronostic obtenues. Flexibilité de l'approche due à l'intégration de connaissance de la structure des mécanismes de dégradation	Nécessite une connaissance liée au mécanisme de dégradation

Une analyse des états futurs des différents indicateurs d'état, puis la proposition d'une méthodologie permettant d'intégrer l'évolution des scores de ces indicateurs qui seraient propagées dans les modèles d'évaluation de la performance seraient pertinentes afin de permettre aux gestionnaires de réduire et étaler les coûts de maintenance de leurs ouvrages. Parmi les indicateurs d'état dont nous disposons pour évaluer la performance d'un ouvrage hydraulique en remblai vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne et affouillement, un certain nombre se prêtent facilement à la définition de courbes de tendance, c'est-à-dire à la représentation en fonction du temps d'une évolution de la dégradation d'un indicateur suite à son vieillissement linéaire ou non. Par exemple, l'indicateur d'état « *degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu* » dispose déjà dans son échelle d'évaluation de données à différents temps et se prête donc bien à du pronostic. Nous notons cependant que, lors de l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire, la notion de pronostic est déjà perfectible dans nos modèles. En effet, les indicateurs d'état sont généralement évalués par utilisateur : celui-ci se projette à la prochaine crue ou au prochain cycle d'évaluation, étant donné qu'une digue de protection n'est pas en charge permanente à la différence d'un barrage qui peut être diagnostiqué à l'instant « t » de la visite.

## 2. Perspectives opérationnelles

Les modèles développés pourront à terme être utilisés dans le cadre de visites d'ouvrages règlementaires comme par exemple dans le cadre d'une étude de danger, d'une visite technique approfondie (VTA), ...

### 2.1. Développement d'un outil informatique d'évaluation de la performance

L'une des perspectives opérationnelles attrayantes de ce type de méthode est que ces développements peuvent donner lieu à la création d'un outil informatique. Cet outil pourrait être utilisé sur une tablette numérique afin d'être accessible au cours d'une visite d'ouvrage. Les indicateurs d'état basés sur des informations visuelles pourraient être renseignés in situ. Les données provenant du dossier de l'ouvrage pourraient quant à elle être entrées à un autre moment. Sur la base des notes de chaque indicateur d'état, un diagnostic de la performance de l'ouvrage vis-à-vis d'un mécanisme de détérioration serait ensuite réalisé par le modèle. Ainsi, l'outil informatique intégrerait les relevés d'informations, proposerait le diagnostic et faciliterait la traçabilité des résultats.

## *2.2. Guide pour le diagnostic des ouvrages hydrauliques soumis à la présence de végétation arborescente*

L'originalité de ces travaux de thèse réside principalement dans la prise en compte détaillée de la végétation arborescente dans les modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai. Les travaux engagés en amont et au cours de la thèse de Zanetti (2010) intitulée « Caractérisation du développement des systèmes racinaires ligneux dans les digues » par Irstea ont été synthétisés dans un guide technique « Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai » (Vennetier et al., 2015). En complément de ce guide, nous souhaiterions proposer aux gestionnaires d'ouvrages hydrauliques un guide technique permettant de réaliser un diagnostic rapide de leur ouvrage vis-à-vis des mécanismes de détérioration potentiellement induits ou aggravés par la présence de végétation arborescente. Ce guide inclurait les résultats obtenus au cours de cette thèse, transcrits de manière à être opérationnels.

## *2.3. Capitalisation et transmission des connaissances expertes*

Les systèmes à base de connaissances que nous utilisons pour développer des outils d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques sont bien adaptés à la représentation de connaissances d'experts. Ainsi, les méthodes basées sur le recueil et la formalisation des connaissances permettent la capitalisation de ces connaissances et leurs transmissions. Cet aspect est important à considérer et représente une perspective opérationnelle forte pour la suite de nos travaux, à savoir capitaliser les connaissances pour pallier les départs à la retraite ou les mutations mais également faciliter la formation d'experts débutants. Le développement de méthodes spécifiques de transmission des connaissances peut être envisagé dans le but de faciliter l'appropriation des méthodes et des outils par de nouveaux utilisateurs. Il s'agirait notamment de proposer des supports expliquant de manière didactique et conviviale les différents points nécessaires à l'utilisation des modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques. Cette perspective a vocation opérationnelle repose sur des apports méthodologiques.



# Conclusion générale





Ces travaux de thèse ont porté sur le développement d'approches et de méthodes pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques, à charge temporaire ou permanente, soumis à une végétation arborescente. Cette dernière représente un important facteur de fragilité notamment vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne et affouillement. Ces travaux répondent au besoin actuel des gestionnaires et propriétaires de disposer d'outils de diagnostic de leurs ouvrages. Ce premier diagnostic permet de cibler les actions prioritaires à mettre en œuvre et fixer un plan de gestion de la végétation arborescente optimum.

Le développement de modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai peut passer par plusieurs approches : la modélisation physique, la modélisation fonctionnelle, l'analyse statistique, les méthodes d'aide à la décision multicritères, l'intelligence artificielle incluant les méthodes à base de connaissances. Nous nous appuyons sur ce dernier type de méthodes en partant des modèles existants pour l'évaluation des ouvrages à charge temporaire (Vuillet, 2012) et permanente (Curt, 2008). Le développement des modèles a été conduit en étroite collaboration avec un groupe d'ingénieurs experts.

Les apports ont été faits sur quatre champs.

Les premiers résultats portent sur l'identification d'indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente à partir des méthodes de la sûreté de fonctionnement (analyse fonctionnelle et analyse des modes de défaillance et de leurs effets). Nos travaux ont abouti au total à l'identification de 8 indicateurs d'état impliqués dans l'évaluation d'ouvrages hydrauliques à charge temporaire vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne ou affouillement et d'ouvrages à charge permanente, drainés ou non vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne.

L'indicateur d'état « *degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu* » est une information non accessible directement. Des dispositifs expérimentaux de vieillissement de racines in situ ont été exploités et des mesures indirectes ont donc été développées afin d'améliorer la connaissance sur la vitesse d'évolution de la décomposition des systèmes racinaires. Des méthodes qualitatives et quantitatives ont été utilisées afin de suivre l'évolution de la décomposition. Nous disposons actuellement d'une base de données constituées par les empreintes spectrales acquises en SPIR sur les échantillons de racines allant jusqu'à six années de décomposition. Les traitements chimiométriques associés à ces analyses en SPIR et, plus particulièrement les modèles de régression PLS développés, nous permettent in fine de prédire le stade de décomposition auquel appartient un échantillon inconnu sur la base des échantillons récoltés sur les dispositifs expérimentaux.

Des modèles d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge temporaire vis-à-vis des mécanismes de détérioration par érosion interne et affouillement du fait de la présence de végétation arborescente ont été produits en se basant sur les modèles existants de Vuillet (2012). Ce dernier se focalisait sur la formalisation et l'agrégation de critères fonctionnels pour l'évaluation d'un indicateur de performance relatif à un mécanisme de détérioration. Nous avons amélioré ces modèles en travaillant au niveau le plus bas du modèle hiérarchique : les indicateurs d'état. Les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente sont introduits. L'ensemble des indicateurs d'état nécessaires pour l'évaluation de chacun des critères fonctionnels sont formalisés, ainsi que les structures d'agrégation menant à l'évaluation des critères.

Pour les ouvrages hydrauliques à charge permanente soumis à la végétation arborescente, nous sommes basés sur les modèles développés par Curt (2008). Ces modèles concernent les barrages en remblai bien entretenus, équipés de systèmes de drainage et d'instruments d'auscultation vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne par suffusion. Dans la thèse, nous avons balayé une gamme beaucoup plus large. Nos travaux ont ainsi permis :

- d'intégrer les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente ;

- d'adapter ces modèles pour tenir compte de l'absence de système de drainage et / ou d'instruments d'auscultation en proposant une approche modulaire d'obtention de modèles d'évaluation ;
- de modifier les règles d'agrégation afin de s'intéresser de manière plus large au mécanisme d'érosion interne.

Dans un cadre de validation, ces résultats ont été appliqués sur trois cas d'ouvrages hydrauliques à charge temporaire et sept cas d'ouvrages hydrauliques à charge permanente.

En termes de perspectives, nous proposons à la fois des perspectives méthodologiques et opérationnelles :

Au niveau méthodologique, les pistes sont les suivantes :

- enrichir les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente sur les ouvrages hydrauliques grâce aux travaux de détection des systèmes racinaires par méthodes géophysiques réalisés dans le cadre de la thèse de Mary (2015) ;
- poursuivre et mettre en place de nouveaux dispositifs expérimentaux pour le suivi de la décomposition d'échantillons de racines ligneuses ;
- améliorer les modèles en y intégrant les imperfections liées aux informations ;
- passer du diagnostic d'un ouvrage hydraulique vis-à-vis d'un mécanisme de détérioration donnée à un pronostic en utilisant des courbes de tendances d'évolution des indicateurs d'état ;
- développer des modèles d'évaluation de la performance pour d'autres types d'ouvrages hydrauliques et vis-à-vis d'autres mécanismes de détérioration.

Au niveau opérationnel, les pistes concernent :

- le développement d'un outil informatique de diagnostic permettant d'automatiser les agrégations dans le modèle ;
- un guide pour le diagnostic des ouvrages hydrauliques en remblai vis-à-vis des mécanismes de détérioration potentiellement initiés ou aggravés par la présence de végétation arborescente.
- l'amélioration de la capitalisation et de la transmission du savoir d'ingénieurs expert à travers ce type de modèles ;

# Bibliographie



- Aber, J.D., Melillo, J.M., McClaugherty, C.A., 1990. Predicting long-term patterns of mass loss, nitrogen dynamics, and soil organic matter formation from initial fine litter chemistry in temperate forest ecosystems. *Can. J. Bot.* 68, 2201–2208. doi:10.1139/b90-287
- AFNOR, 2001. Norme homologuée NF EN13306 Terminologie de la maintenance.
- AFNOR, 1996. Vocabulaire de la valeur, de l'analyse de la valeur et de l'analyse fonctionnelle - Partie 1: analyse de la valeur et analyse fonctionnelle.
- AFNOR, 1994. Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie.
- Akerkar, R., Sajja, P., 2009. Knowledge-based systems. Jones and Bartlett, Sudbury, Mass.
- Andersen, G.R., Chouinard, L.E., Hover, W.H., Cox, C.W., 2001. Risk indexing tool to assist in prioritizing improvements to embankment dam inventories. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 127, 325–334.
- Andersen, G.R., Iii, T., H, V., 1995. Function-Based Condition Indexing for Embankment Dams. *J. Geotech. Eng.* 121.
- Aulen, M., Shipley, B., Bradley, R., 2012. Prediction of in situ root decomposition rates in an interspecific context from chemical and morphological traits. *Ann. Bot.* 109, 287–297. doi:10.1093/aob/mcr259
- Benahmed, N., Bonelli, S., 2007. Etude expérimentale de l'érosion interne d'une kaolinite, in: In Proceedings of XXVèmes Rencontres Universitaires de Genie Civil. Brdeaux, France.
- Berg, B., 1984. Decomposition of root litter and some factors regulating the process: Long-term root litter decomposition in a scots pine forest. *Soil Biol. Biochem.* 16, 609–617. doi:10.1016/0038-0717(84)90081-6
- Berg, B., Johansson, M., Meentemeyer, V., Kratz, W., 1998. Decomposition of tree root litter in a climatic transect of coniferous forests in northern Europe: A synthesis. *Scand. J. For. Res.* 13, 402–412. doi:10.1080/02827589809383000
- Bonnefous, C., 2001. Indicateurs de performance, Editions HERMES. ed. Sciences publication, Paris.
- Booker, J.M., McNamara, L.A., 2004. Solving black box computation problems using expert knowledge theory and methods. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 85, 331–340. doi:10.1016/j.res.2004.03.021
- Bouchon-Meunier, B., 1999. La Logique floue, Édition : 2e édition. ed. Presses Universitaires de France - PUF, Paris.
- Çetinkol, Ö.P., Smith-Moritz, A.M., Cheng, G., Lao, J., George, A., Hong, K., Henry, R., Simmons, B.A., Heazlewood, J.L., Holmes, B.M., 2012. Structural and Chemical Characterization of Hardwood from Tree Species with Applications as Bioenergy Feedstocks. *PLoS ONE* 7. doi:10.1371/journal.pone.0052820
- CFGB, 1997. Internal erosion: typology, detection, repair.
- Chandioux, O., Vennetier, M., 2003. Etude de la végétation des digues du Rhône. Troisième partie : plan de gestion de la végétation.
- Chave, J., 2006. Measuring Wood Density for Tropical Forest Trees a Field Manual. Sixth Framew. Programme 6.
- Chen, H., Harmon, M.E., Griffiths, R.P., 2001. Decomposition and nitrogen release from decomposing woody roots in coniferous forests of the Pacific Northwest: a chronosequence approach. *Can. J. For. Res.* 31, 246–260. doi:10.1139/cjfr-31-2-246
- Chen, H., Harmon, M.E., Griffiths, R.P., Hicks, W., 2000. Effects of temperature and moisture on carbon respired from decomposing woody roots. *For. Ecol. Manag.* 138, 51–64. doi:10.1016/S0378-1127(00)00411-4
- Corcoran, M.K., Gray, D.H., Biedenharn, D.S., Little, C.D., Leech, J.R., Pinkard, F., Bailey, P., Lee, L.T., 2010. Literature Review - Vegetation on Levees.
- Creed, I.F., Webster, K.L., Morrison, D.L., 2004. A comparison of techniques for measuring density and concentrations of carbon and nitrogen in coarse woody debris at different stages of decay. *Can. J. For. Res.* 34, 744–753.
- Cremona, C., 2003. Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants., Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. France.
- Curt, C., 2013. Combining knowledge-based method and possibility-based approach for the assessment of dam performance, in: Dams: Structure, Performance and Safety Management. Nova Science Publishers, pp. 1–38.

- Curt, C., 2008. Evaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances. Application aux barrages en remblai. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.
- Curt, C., Peyras, L., Boissier, D., 2010. A Knowledge Formalization and Aggregation-Based Method for the Assessment of Dam Performance. *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.* 25, 171–183.
- Curt, C., Trystram, G., Hossenlopp, J., 2001. Formalisation of at-line human evaluations to monitor product changes during processing. Integration of human decision in the dry sausage ripening process. *Sci. Aliments* 663–681.
- Deroo, L., Fry, J.-J., 2014. *Projet National ERINOH - Erosion interne - Approches et besoins en matière d'ingénierie (Rapport de recherche No. LC/10/ERI/68)*.
- Dion, R., 1961. *Histoire des Levées de la Loire*.
- Dornbush, M.E., Isenhardt, T.M., Raich, J.W., 2002. QUANTIFYING FINE-ROOT DECOMPOSITION: AN ALTERNATIVE TO BURIED LITTERBAGS. *Ecology* 83, 2985–2990. doi:10.1890/0012-9658(2002)083[2985:QFRDAA]2.0.CO;2
- Fakhfakh, I., Le Goc, M., Torres, L., Curt, C., 2012. Modeling and Diagnosis Characterization using Timed Observation Theory. Presented at the ICISOFT, pp. 332–335.
- Farinha, F., Portela, E., Domingues, C., Sousa, L., 2005. Knowledge-based systems in civil engineering: Three case studies. *Adv. Eng. Softw.* 36, 729–739. doi:10.1016/j.advengsoft.2005.03.019
- FEMA, 2005. *Technical Manual for Dam Owners: Impacts of Plants on Earthen Dams*. Federal Emergency Management Agency, Us Department of Homeland Security.
- Figeac, N., 2003. *Ecriture des scénarios de vieillissement des barrages en remblai à partir d'une méthodologie basée sur la modélisation fonctionnelle et l'analyse d'expertise*.
- FLOODSAFE CALIFORNIA, 2012. *Urban levee design criteria*. The Natural Resources Agency Department of Water Ressources, State of California, Sacramento, USA.
- Foster, M., Fell, R., Spannagle, M., 2000. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Can. Geotech. J.* 37, 1000–1024. doi:10.1139/t00-030
- Foussadier, R., 2003. Les systèmes racinaires des arbres de la ripisylve: effets des contraintes physiques et exemples, in: *Les Forêts Riveraines Des Cours D'eau, écologie, Fonctions et Gestion*. Paris, pp. 124–133.
- Freyburger, C., Longuetaud, F., Mothe, F., Constant, T., Leban, J.-M., 2009. Measuring wood density by means of X-ray computer tomography. *Ann. For. Sci.* 66, 804.
- Fuller, M.P., Ritter, G.L., Draper, C.S., 1988. Partial least squares quantitative analysis of infrared spectroscopic data. Part I: algorithm implementation; Part II: application to detergent analysis. *Appli Spectrosc, Appli. Spectrosc.* 217–236.
- Gaydou, V., 2010. *Développement des méthodes multitableaux pour les spectroscopies proche et moyen infrarouge. Application aux carburants et aux huiles essentielles de lavande*. Aix-Marseille 3.
- Gijssman, A.J., Alarcón, H.F., Thomas, R.J., 1997. Root decomposition in tropical grasses and legumes, as affected by soil texture and season. *Soil Biol. Biochem.* 29, 1443–1450. doi:10.1016/S0038-0717(97)00039-4
- Goebel, M., Hobbie, S.E., Bulaj, B., Zadworny, M., Archibald, D.D., Oleksyn, J., Reich, P.B., Eissenstat, D.M., 2011. Decomposition of the finest root branching orders: linking belowground dynamics to fine-root function and structure. *Ecol. Monogr.* 81, 89–102. doi:10.1890/09-2390.1
- Goh, K., Tjahjono, B., Baines, T., Subramaniam, S., 2006. A review of research in manufacturing prognostics. Presented at the Industrial Informatics, 2006 IEEE International Conference on, IEEE, pp. 417–422.
- Gucik-Derigny, D., 2011. *Contribution au pronostic des systèmes à base de modèles: théorie et application*. PhD thesis, L'Université paul cézanne aixmarseille III.
- Gupta, R., Kewalramani, M.A., Goel, A., 2006. Prediction of concrete strength using neural-expert system. *J. Mater. Civ. Eng.* 18, 462–466.
- Haaland, D.M., Thomas, E.V., 1988. Partial least-squares methods for spectral analyses. 1. Relation to other quantitative calibration methods and the extraction of qualitative information. *Anal. Chem.* 60, 1193–1202. doi:10.1021/ac00162a020

- Haling, R.E., Tighe, M.K., Flavel, R.J., Young, I.M., 2013. Application of X-ray computed tomography to quantify fresh root decomposition in situ. *Plant Soil*. doi:10.1007/s11104-013-1777-y
- Harmon, M.E., Sexton, J., 1996. Guidelines for measurements of woody detritus in forest ecosystems. US LTER Network Office Seattle (WA).
- Haselsteiner, R., 2010. Woody Vegetation on Small Embankment Dams.
- Hayes-Roth, F., 1985. Rule-based Systems. *Commun ACM* 28, 921–932. doi:10.1145/4284.4286
- HIDALGO, A.P., VUILLET, M., BARRIO, C.D., SERRE, D., DIAB, Y., 2013. Proposition d'un outil d'optimisation technico-économique de la gestion patrimoniale des ouvrages de la RATP. Presented at the AUGC, Cachan.
- Hood, I.A., Garrett, L.G., Gardner, J.F., Pearce, S.H., 2011. Decay fungi in decomposing post-harvest *Pinus radiata* root and branch debris. *N. Z. Plant Prot.* 64, 188–194.
- ICOLD, 2012. Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations (In preparation). International Commission on Large Dams, Paris.
- Janisch, J.E., Harmon, M.E., Chen, H., Fasth, B., Sexton, J., 2005. Decomposition of coarse woody debris originating by clearcutting of an old-growth conifer forest. *Ecoscience* 12, 151–160. doi:10.2980/i1195-6860-12-2-151.1
- JOLLIFFE, I., 2002. Principal component analysis, POD.
- Jones, P.D., Schimleck, L.R., Peter, G.F., Daniels, R.F., Iii, A.C., 2006. Nondestructive estimation of wood chemical composition of sections of radial wood strips by diffuse reflectance near infrared spectroscopy. *Wood Sci. Technol.* 40, 709–720. doi:10.1007/s00226-006-0085-6
- Kayser, D., 1997. La représentation des connaissances. Hermès.
- Keeney, R.L., Raiffa, H., 1993. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs. Cambridge University Press.
- Kelley, S., Rials, T., Groom, L., Sluiter, A., 2004. Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. *Wood Sci Technol* 257–276.
- Köstler, J.N., Brückner, E., Bibelriether, H., 1968. Die Wurzeln der Waldbäume: Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. P. Parey, Hamburg [etc.].
- Krankina, O.N., Harmon, M.E., 1995. Dynamics of the Dead Wood Carbon Pool in Northwestern Russian Boreal Forests, in: Apps, M.J., Price, D.T., Wisniewski, J. (Eds.), *Boreal Forests and Global Change*. Springer Netherlands, pp. 227–238.
- Laasonen, J., 2013. Risk of the trees and the stumps to the embankment dam safety. Experimental study. Presented at the IECS2013, 9th ICOLD European Club Symposium, Venice, Italy.
- Lachouette, D., Bonelli, S., Brivois, O., 2007. Modélisation de l'érosion par renard hydraulique, in: XXV Rencontres Universitaires de Genie Civil. Bordeaux, France.
- Lair, J., Boissier, D., 2000. Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment = Durability assessment of building systems [WWW Document]. URL <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=204968> (accessed 1.30.15).
- Lei, P., Bauhus, J., 2010. Use of near-infrared reflectance spectroscopy to predict species composition in tree fine-root mixtures. *Plant Soil* 333, 93–103. doi:10.1007/s11104-010-0325-2
- Liu, X., Wu, Z., Yang, Y., Hu, J., Xu, B., 2012. Information fusion diagnosis and early-warning method for monitoring the long-term service safety of high dams. *J. Zhejiang Univ. Sci. A* 13, 687–699. doi:10.1631/jzus.A1200122
- Longuetaud, F.A., 2005. Detection et analyse non destructives de caractéristiques internes de billons d'Epicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.) par tomographie à rayons X. Paris, ENGR.
- Ludovici, K.H., Zarnoch, S.J., Richter, D.D., 2002. Modeling in-situ pine root decomposition using data from a 60-year chronosequence. *Can. J. For. Res.* 32, 1675–1684. doi:10.1139/x02-073
- Malkavaara, P., Raimo, A., 1998. A spectroscopic method for determining lignin content of softwood and hardwood kraft pulps. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 44, 287–292.
- Manlay, R.J., Masse, D., Chevallier, T., Russell-Smith, A., Friot, D., Feller, C., 2004. Post-fallow decomposition of woody roots in the West African savanna. *Plant Soil* 260, 123–136.
- Mao, R., Zeng, D.-H., Li, L.-J., 2011. Fresh root decomposition pattern of two contrasting tree species from temperate agroforestry systems: effects of root diameter and nitrogen enrichment of soil. *Plant Soil* 347, 115–123. doi:10.1007/s11104-011-0830-y



- Marten, G.C., Shenk, J.S., Barton, F.E., Service, U.S.A.R., 1989. Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS): analysis of forage quality. U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Martens, H., Næs, T., 1989. Multivariate calibration. Wiley.
- Martinez Santamaria, J.M., Fernandez Serrano, R., 2010. Geotechnical impact on small earth dams caused by vegetation growth as a result of inadequate maintenance activity, in: Dam Maintenance and Rehabilitation II. p. 1162.
- Mary, B., 2015. Développement de l'imagerie des systèmes racinaires dans les ouvrages hydrauliques en remblai par tomographie électrique et acoustique.
- Mary, B., Saracco, G., Peyras, L., Mériaux, P., Vennetier, M., Zanetti, C., 2013. Vers le développement de méthodes géophysiques pour la détection de racines ligneuses dans les ouvrages hydrauliques en remblai. 31èmes Rencontres L'AUGC.
- Mary, B., Saracco, G., Peyras, L., Vennetier, M., Mériaux, P., Baden, D., 2015. Preliminary Use of Ultrasonic Tomography Measurement to Map Tree Roots Growing in Earth Dikes. *Phys. Procedia* 70, 965–969. doi:10.1016/j.phpro.2015.08.201
- McClougherty, C.A., Aber, J.D., Melillo, J.M., 1984. Decomposition Dynamics of Fine Roots in Forested Ecosystems. *Oikos* 42, 378. doi:10.2307/3544408
- Mériaux, P., Royet, P., Folton, C., 2004. Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations: guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires. Éditions Quae.
- Mériaux, P., Vennetier, M., Aigouy, S., Hoonakker, M., Zylberlat, M., 2006. Diagnosis and management of plant growth on embankment dams and dykes. Presented at the Vingt-deuxième Congrès des Grands Barrages, Barcelone, pp. 1–20.
- Olajuyigbe, S., Tobin, B., Hawkins, M., Nieuwenhuis, M., 2012. The measurement of woody root decomposition using two methodologies in a Sitka spruce forest ecosystem. *Plant Soil* 360, 77–91. doi:10.1007/s11104-012-1222-7
- Olson, J.S., 1963. Energy Storage and the Balance of Producers and Decomposers in Ecological Systems. *Ecology* 44, 322–331. doi:10.2307/1932179
- Osterloh, K., Raedel, C., Zscherpel, U., Meinel, D., Ewert, U., Buecherl, T., Hasenstab, A., 2008. Fast neutron radiography and tomography of wood. *Insight - Non-Destr. Test. Cond. Monit.* 50, 307–311. doi:10.1784/insi.2008.50.6.307
- Paquier, A., Robin, O., 1995. Une méthode simple pour le calcul des ondes de rupture de barrage. *Houille Blanche* 29–34. doi:10.1051/lhb/1995077
- Peyras, L., 2003. Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages. Développement de méthodes d'aide à l'expertise. (Science pour l'ingénieur, spécialité Génie Civil). Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, Clermont Ferrand.
- Peyras, L., Royet, P., Boissier, D., Vergne, A., 2004. Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages: développement de méthodes d'aide à l'expertise. *Ingénieries* N°38 3–12.
- Peyras, L., Tourment, R., Vuillet, M., Beullac, B., Delaunay, C., Bambara, G., 2015. Development of an expert led GIS based approach for assessing the performance of river levees: the Digsure method and tool. *J. Flood Risk Manag.* n/a–n/a. doi:10.1111/jfr3.12178
- Picon-Cochard, C., Pilon, R., Revaillet, S., Jestin, M., Dawson, L., 2009. Use of near-infrared reflectance spectroscopy to predict the percentage of dead versus living grass roots. *Plant Soil* 317, 309–320. doi:10.1007/s11104-008-9810-2
- Piechowiak, S., 2003. Intelligence Artificielle et Diagnostic. Ed. Techniques Ingénieur.
- Poke, F.S., Raymond, C.A., 2006. Predicting Extractives, Lignin, and Cellulose Contents Using Near Infrared Spectroscopy on Solid Wood in *Eucalyptus globulus*. *J. Wood Chem. Technol.* 26, 187–199. doi:10.1080/02773810600732708
- Prasad, B.N., Finkelstein, S.M., Hertz, M.I., 1996. An expert system for diagnosis and therapy in lung transplantation. *Comput. Biol. Med.* 26, 477–488.
- Racoceanu, D., 2006. Contribution à la surveillance des Systèmes de Production en utilisant les Techniques de l'Intelligence Artificielle. Habilit. À Dir. Rech. Univ. FRANCHE COMTÉ Besançon Fr.

- Renvall, P., 1995. Community structure and dynamics of wood-rotting Basidiomycetes on decomposing conifer trunks in northern Finland. *Karstenia* 35, 1–51.
- Ripert, C., Doirat, G., 2003. Etude du plan de gestion de la végétation arborée des digues de l'Isère (Etude).
- Rounds, S.A., 2002. Development of a neural network model for dissolved oxygen in the Tualatin River, Oregon. Presented at the Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, Nevada.
- Roy, B., Bouyssou, D., 1993. Aide multicritère à la décision : méthodes et cas.
- Saaty, T.L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.
- Sanaullah, M., Chabbi, A., Leifeld, J., Bardoux, G., Billou, D., Rumpel, C., 2010. Decomposition and stabilization of root litter in top- and subsoil horizons: what is the difference? *Plant Soil* 338, 127–141. doi:10.1007/s11104-010-0554-4
- Sandak, A., Sandak, J., Zborowska, M., Prądzyński, W., 2010. Near infrared spectroscopy as a tool for archaeological wood characterization. *J. Archaeol. Sci.* 37, 2093–2101. doi:10.1016/j.jas.2010.02.005
- Sandström, F., Petersson, H., Kruys, N., Ståhl, G., 2007. Biomass conversion factors (density and carbon concentration) by decay classes for dead wood of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula* spp. in boreal forests of Sweden. *For. Ecol. Manag.* 243, 19–27. doi:10.1016/j.foreco.2007.01.081
- Scheu, S., Schauer mann, J., 1994. Decomposition of roots and twigs: Effects of wood type (beech and ash), diameter, site of exposure and macrofauna exclusion. *Plant Soil* 163, 13–24. doi:10.1007/BF00033936
- Schreiber, G., Akkermans, H., Anjewierden, A., Hoog, R. de D., Shadbolt, N.R., Velde, W. van V. de, Wielinga, B.J., 1999. *Knowledge Engineering and Management: The CommonKADS Methodology*. The MIT Press, Cambridge, Mass.
- Serre, D., 2005. Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique. (Sciences de l'Information Géographique). Université de Marne-La-Vallée, Paris.
- Sharp, M., Wallis, M., Deniaud, F., Hersch-Burdick, R., Tourment, R., Matheu, E., Seda-Sanabria, Y., Wersching, S., Veylon, G., Durand, E., Smith, P., Forbis, J., Spliethoff, C., 2013. *The international Levee Handbook*. CIRIA.
- Shorohova, E., Kapitsa, E., Vanha-Majamaa, I., 2008. Decomposition of stumps 10 years after partial and complete harvesting in a southern boreal forest in Finland. *Can. J. For. Res.* 38, 2414–2421. doi:10.1139/X08-083
- Silver, W.L., Miya, R.K., 2001. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects. *Oecologia* 129, 407–419.
- Su, H., Wu, Z., Wen, Z., 2007. Identification Model for Dam Behavior Based on Wavelet Network. *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.* 22, 438–448. doi:10.1111/j.1467-8667.2007.00499.x
- Tacnet, J.M., 2009. *Prise en compte de l'incertitude dans l'expertise des risques naturels en montagne par analyse multicritères et fusion d'information* (Sciences et Génie de l'Environnement). Ecole Nationale Supérieure des Mines Saint Etienne, Saint Etienne.
- Talon, A., 2006. *Evaluation des scénarii de dégradation des produits de construction*. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.
- Terrasol, Hydratec, 2010. *Plan Rhône \_ Pré-schéma Sud : Etude du renforcement et décorsetage limité des digues du Petit Rhône. Etudes préliminaires et d'avant projets Lot 2 : Rive gauche du Petit Rhône du lieu-dit "Mas des Canards" au lieu-dit "Les Roussettes": phase 1, phase 2, phase 3, phase 4, phase 5 (No. 009-24979-Ph2)*. SYMADREM.
- Tobin, B., Black, K., McGurdy, L., Nieuwenhuis, M., 2007. Estimates of decay rates of components of coarse woody debris in thinned Sitka spruce forests. *Forestry* 80, 455–469. doi:10.1093/forestry/cpm024
- USACE, 2009. *Guidelines for landscape planting and vegetation management at levees, flood walls, embankment dams, and appurtenant structures* (Engineer Technical Letter No. ETL 1110-2-571). US Army Corps of Engineers, Washington DC, USA.

- Vennetier, M., al, 2001. Plan de gestion de la végétation des digues du Rhône, rapport d'étape, première année, diagnostic de la végétation des digues.
- Vennetier, M., Mériaux, P., Zanetti, C., 2015. Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai: guide technique, Irstea. ed. Cardere éditeur, France.
- Villemeur, A., 1988. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels: fiabilité, facteurs humains, informatisation. Eyrolles.
- Vogt, K., Grier, C., Vogt, D.J., 1986. Production , turnover, and nutrient dynamics of above- and below-ground detritus of world forest. *Adv. Ecol. Res.* 15, 303–366.
- Vuillet, M., 2012. Élaboration d'un modèle d'aide à la décision basé sur une approche probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues fluviales (Génie Urbain). Université PARIS-EST. Ecole doctorale "Ville, Transports et Territoires," Paris.
- Wold, S., Esbensen, K., Geladi, P., 1987. Principal component analysis. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 2, 37–52. doi:10.1016/0169-7439(87)80084-9
- Wu, Z., Su, H., 2005. Dam health diagnosis and evaluation. *Smart Mater. Struct.* 14, S130–S136. doi:10.1088/0964-1726/14/3/016
- Xu, Y., Zhang, L.M., Jia, J.S., 2011. Diagnosis of embankment dam distresses using Bayesian networks. Part II. Diagnosis of a specific distressed dam. *Can. Geotech. J.* 48, 1645–1657. doi:10.1139/t11-070
- Yatskov, M., Harmon, M.E., Krankina, O.N., 2003. A chronosequence of wood decomposition in the boreal forests of Russia. *Can. J. For. Res.* 33, 1211–1226. doi:10.1139/x03-033
- Zanetti, C., 2010. Caractérisation du développement des systèmes racinaires ligneux dans les digues. Université de Provence, Aix-en-Provence.
- Zanetti, C., Vennetier, M., Mériaux, P., 2013. Développement et décomposition des systèmes racinaires: risques induits pour les digues et solutions de gestion, in: 2ème Colloque National - Dignes 2013. Aix-en-Provence, France.
- Zanetti, C., Vennetier, M., Mériaux, P., Provansal, M., 2015. Plasticity of tree root system structure in contrasting soil materials and environmental conditions. *Plant Soil* 387, 21–35. doi:10.1007/s11104-014-2253-z
- Zanetti, C., Vennetier, M., Mériaux, P., Royet, P., Dufour, S., Provansal, M., 2008. L'enracinement des arbres dans les digues en remblai: étude des systèmes racinaires et impacts sur la sécurité des ouvrages. *Ingénieries-EAT* 49–67.
- Zanetti, C., Vennetier, M., Mériaux, P., Royet, P., Provansal, M., 2011. Managing woody vegetation on earth dikes: Risks assessment and maintenance solutions. *Procedia Environ. Sci.* 9, 196–200. doi:10.1016/j.proenv.2011.11.030
- Zhang, L.M., Xu, Y., Jia, J.S., Zhao, C., 2011. Diagnosis of embankment dam distresses using Bayesian networks. Part I. Global-level characteristics based on a dam distress database. *Can. Geotech. J.* 48, 1630–1644. doi:10.1139/t11-069
- Zhao, Z., Chen, C., 2001. Concrete bridge deterioration diagnosis using fuzzy inference system. *Adv. Eng. Softw.* 32, 317–325. doi:10.1016/S0965-9978(00)00089-2
- Zwingelstein, G., 1996. La maintenance basée sur la fiabilité: Guide pratique d'application de la RCM. Hermès.
- Zwingelstein, G., 1995. Diagnostic des défaillances: théorie et pratique pour les systèmes industriels. Hermès.

# **Valorisations des travaux de thèse**



### **Publications dans revue à comité de lecture :**

- Bambara, G., Vennetier, M., Curt, C., Mériaux, P., Zanetti, C., Ferrat, S., Vanloot, P., 2015. Characterization of root decomposition located in embankment dikes by near-infrared spectroscopy and chemometrics: study of four deciduous tree species. *JNIRS*. Accepted after revision.
- Bambara G., Curt C., Mériaux P., Vennetier M., Vanloot P., 2015. Modular assessment of the performance of embankment dams. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. Submitted.

### **Participations et publications dans actes de colloques nationaux :**

- Bambara, G., 2015. Evaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de la végétation arborescente : proposition d'une approche modulaire. In **Actes Des 33ème Rencontres Universitaires de Génie Civil, Prix jeunes chercheurs « René Houpert », ISABTP/UPPA, Anglet**, pp.322-329
- Bambara, G., Curt, C., Mériaux, P., Vennetier, M., Vanloot, P., 2014. Evaluation de la vulnérabilité des digues fluviales soumises au développement d'une végétation arborescente, in: **Actes Des 32ème Rencontres Universitaires de Génie Civil. Presented at the De la préservation à l'innovation, Orléans**, pp. 379–388.
- Bambara, G., Curt, C., Mériaux, P., Vennetier, M., Vanloot, P., 2014. Réduire les incertitudes épistémiques pour une meilleure évaluation de la vulnérabilité des digues fluviales, in: **19ème Congrès de Maîtrise Des Risques et Sûreté de Fonctionnement. Presented at the Lambda MU - IMdR, Dijon**.

### **Participation et publication dans actes d'un colloque international :**

- Bambara, G., Curt, C., Vennetier, M., Mériaux, P., Zanetti, C., Vanloot, P., 2013. Characterization of woody roots located in dykes by near-infrared spectroscopy and chemometrics, in: **A1 – Agriculture and Environment. Presented at the NIR2013 Proceedings, La Grande-Motte, France**, pp. 274–279.

### **Chapitre d'ouvrage :**

- Bambara G., Curt C., Mériaux P., Patrocco D., Senesi M. 2015. Barrages soumis à la présence d'une végétation arborescente et d'érosion interne. Pp. 133-151. In : Patrocco D., Bodrato G., Del Vesco R., Peyras L., Boutry M., Ropele P., Collé F., Coord, *Projet RISBA Risques des barrages*. Ed. Verba Volant, Torino. 213p. ISBN 9788894069501.
- Bambara, G., Curt, C., Mériaux, P., Vennetier, M., Vanloot, P., 2014. Développement et formalisation de mesures pour évaluer la performance, vis-à-vis de l'érosion interne, des digues fluviales, in: **Fiabilité Des Matériaux et Des Structures - Analyse de Risques et Fiabilité Des Systèmes Dans Leur Environnement. Presented at the 8èmes journées Fiabilité des matériaux et des structures (JFMS 2014)**, iste editions, Aix-en-Provence, France, pp. 117–129.

### **Guide technique :**

- Bambara G., Curt C., Mériaux P., 2015. Diagnostic de la végétation arborescente sur les ouvrages hydrauliques. En préparation.



# ANNEXES





## ANNEXE 1. Principe du spectromètre Antaris II FT-NI, Thermo-Nicolet

Le spectromètre utilisé est l'Antaris II FT-NIR, Thermo-Nicolet. Ce spectromètre utilise la transformée de Fourier couplée à un interféromètre de Michelson. L'interféromètre de Michelson est un dispositif optique qui produit des interférences par division d'amplitude. Il est constitué de deux miroirs et d'une lame séparatrice semi-réfléchissante. La Figure 102 illustre le principe de ce dispositif.

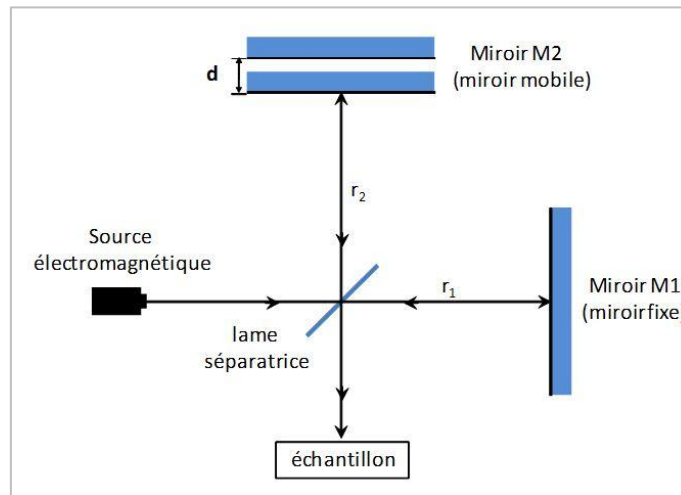


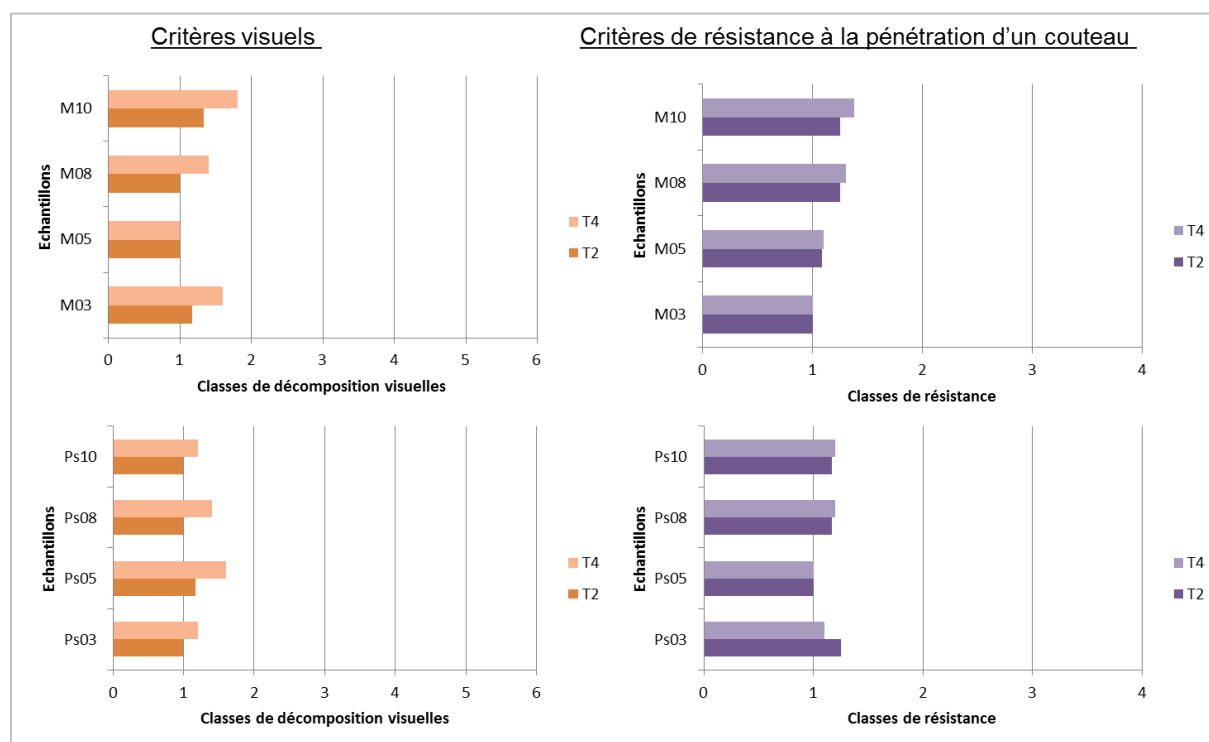
Figure 102. Schéma de l'interféromètre de Michelson (Gaydou, 2010)

La lame semi-réfléchissante sépare le faisceau électromagnétique infrarouge en deux parties d'intensité égale: l'une est réfléchi sur le miroir fixe M1 (rayon électromagnétique  $r_1$ ), tandis que l'autre est réfléchi sur le miroir mobile M2 (rayon électromagnétique  $r_2$ ). Le déplacement du miroir mobile est défini par une certaine distance nommée  $d$ . Chacun de ces deux rayons ( $r_1$  et  $r_2$ ) effectue un aller-retour miroir séparatrice. Selon la distance  $d$  du miroir mobile M2, les deux rayons électromagnétiques du faisceau infrarouge initial seront déphasés. Les rayons électromagnétiques partent ensuite en direction de l'échantillon, passe au travers de celui-ci avant d'arriver au détecteur. En fonction de la distance  $d$  du miroir mobile, le faisceau infrarouge est balayé par des interférences ce qui permet d'obtenir un interférogramme. La transformée de Fourier permet ensuite d'obtenir le spectrogramme à partir de l'interférogramme.

## ***ANNEXE 2. Synthèse des résultats issus des analyses qualitatives et quantitatives du dispositif expérimental de Castérino***

### **Evaluation qualitative**

Nous présentons sur la Figure 103 les résultats obtenus à l'aide des deux types de méthodes qualitatives utilisés après deux ans de décomposition et quatre de décomposition et ce, sur chacune des deux espèces étudiées (pin sylvestre et mélèze) et chaque diamètre (03, 05, 08 et 10).



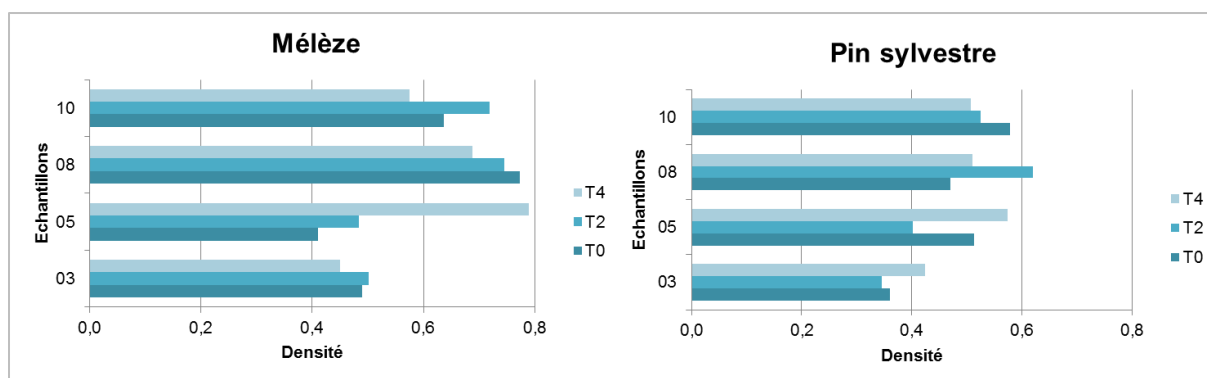
**Figure 103. Résultats de l'évaluation qualitative de la décomposition des échantillons de racines issus du dispositif expérimental de Castérino (Echelle visuelle de 0 à 6 – Echelle de résistance de 0 à 4)**

Globalement, pour l'ensemble des échantillons, nous observons un changement de classe de dégradation aussi bien sur critères visuels que de résistance à la pénétration après deux ans de décomposition. Par contre après quatre ans de décomposition, l'évolution de la dégradation des échantillons ne permet pas de changer de classe. Ces analyses qualitatives nous font émettre l'hypothèse que la vitesse de décomposition est plus lente sur les échantillons du dispositif de Castérino que celui du dispositif de l'Isère (Figure 43). Cette évolution peut signifier que soit les échantillons de racines se décomposent plus lentement dans des régions climatiques montagnardes, soit les conifères sont plus résistants aux agents de décomposition que les feuillus.

### **Evaluation quantitative**

#### **Perte de densité sèche des échantillons**

Les résultats présentés sur la Figure 104 illustrent l'évolution de la perte de densité sèche des échantillons du dispositif expérimental de Castérino en fonction de leur diamètre et leur espèce. Chaque barre horizontale présentée sur les graphes représente la moyenne obtenue après trois répétitions de la mesure pour chaque échantillon.



**Figure 104. Evolution de la densité en fonction du stade de décomposition et des diamètres pour chaque espèce issue du dispositif expérimental de Castérino**

Ces résultats sont peu représentatifs d'une perte de densité sèche en fonction des différents stades étudiés (T0, T2 et T4). Cette variabilité des résultats peut provenir du fait qu'entre chaque stade de décomposition, ceux sont des échantillons différents qui sont analysés. Par exemple, la densité étonnément élevée du mélèze diamètre 05 à T4 peut provenir du fait que cet échantillon a une singularité qui lui est propre.

A partir de cette analyse nous ne dégagons pas de réelle tendance de « vitesse » de décomposition entre les stades. Globalement les pertes de densité entre les trois stades sont faibles comme par exemple pour le mélèze de diamètre 08 ou le pin sylvestre diamètre 10.

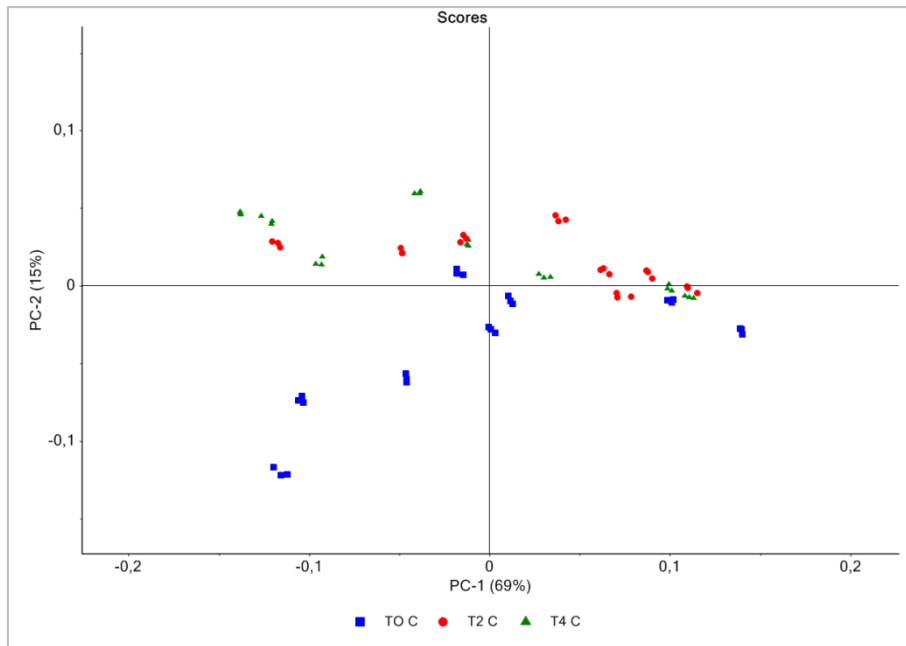
### **Analyse par Spectrométrie Proche InfraRouge (SPIR) des échantillons**

#### **Analyse exploratoire**

##### *Analyse exploratoire sur l'ensemble des échantillons*

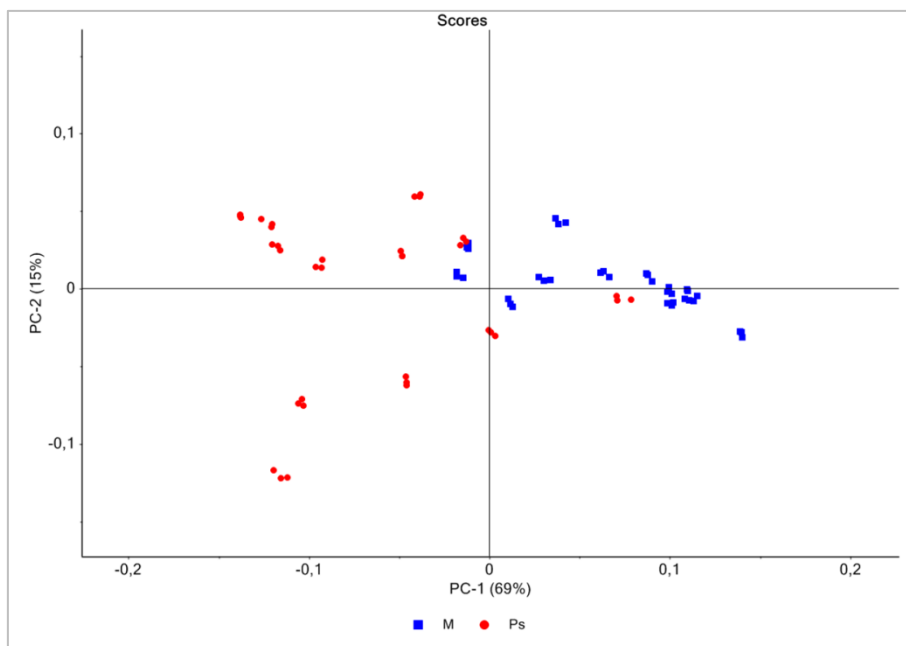
Nous présentons sur la Figure 105 l'ACP dans le plan  $\frac{1}{2}$  réalisée sur l'ensemble des échantillons de racines (n=72) au trois temps de décomposition étudiés (T0, T2, T4). Nous cherchons dans un premier temps à discriminer les temps de décomposition entre eux. La composante principale 1 (PC1) qui représente 69 % de la variance expliquée ne nous permet pas de discriminer ces différents temps. Par contre la PC2 qui représente 15 % de la variance, nous permet de discriminer deux groupes : les T0 et

- les T0 qui sont portés par une contribution négative de la PC2 ;
- les T2 et T4 qui sont portés par une contribution positive de la PC2.



**Figure 105.** Plan  $\frac{1}{2}$  de l'ACP de l'ensemble des échantillons du dispositif de Castérino (n=72 ; variance expliquée 84 %) – illustration de la séparation différents des stades de décomposition (T0, T2 et T4)

Afin d'identifier l'autre facteur discriminant porté par la PC1, nous utilisons la même ACP mais en mettant en évidence les espèces (Figure 106). L'espèce est bien le facteur discriminant. Les échantillons mélèzes et pin sylvestre forment deux groupes bien distincts.

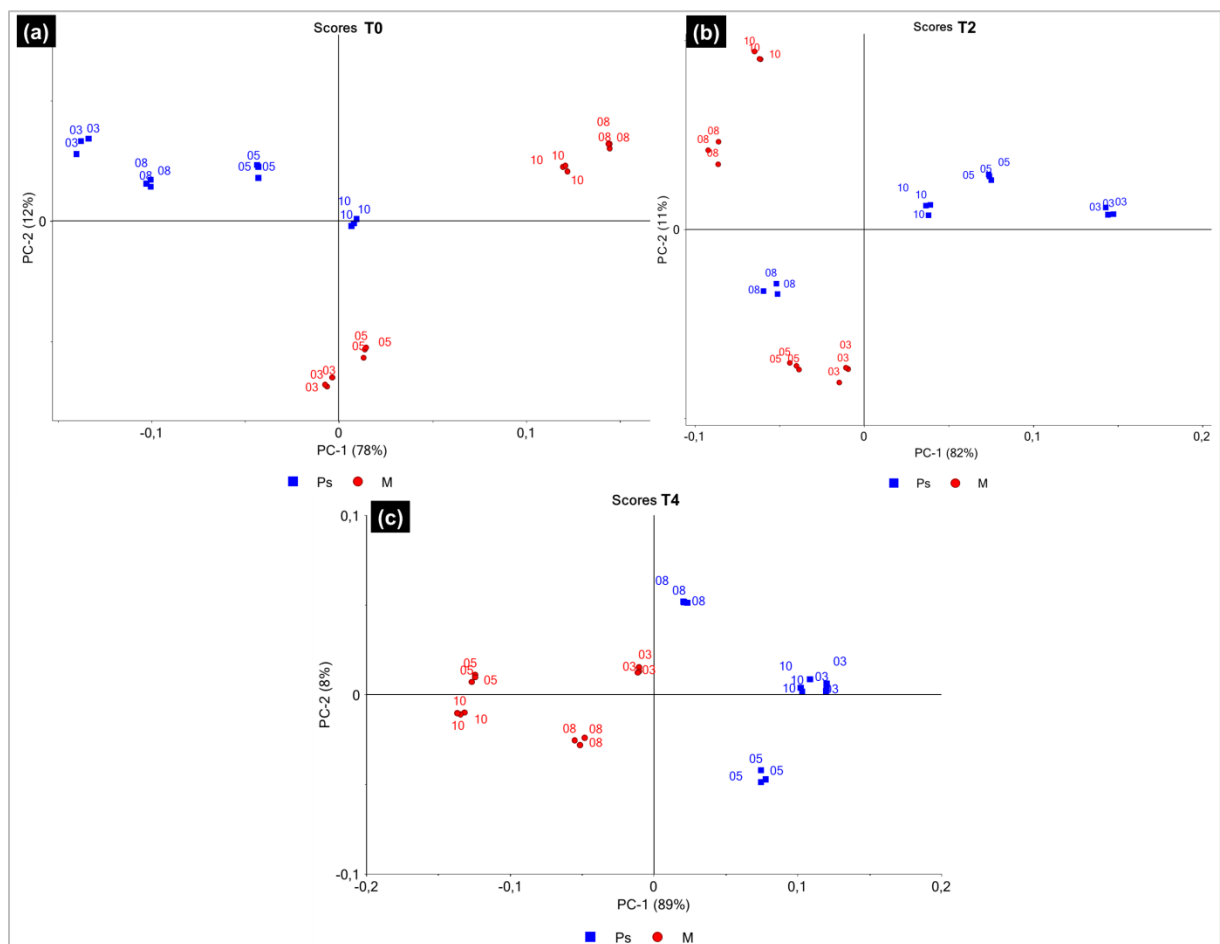


**Figure 106.** Plan  $\frac{1}{2}$  de l'ACP de l'ensemble des échantillons du dispositif de Castérino (n=72 ; variance expliquée 84 %) – illustration de la séparation espèces (M : mélèze et Ps : pin sylvestre) aux différents des stades de décomposition (T0, T2 et T4)

*Analyse exploratoire sur chaque temps de décomposition*

Nous réalisons une ACP pour chaque stade de décomposition (n=24) afin de mettre en évidence des groupes correspondant aux espèces (mélèze et pin sylvestre) et des sous-groupes correspondant aux différents diamètres (03, 05, 08 et 10).

La Figure 107 présente les trois ACP chacune relatives à un stade de décomposition. Nous observons sur chacune deux groupes bien distincts correspondant aux espèces étudiées. De même, des groupements d'échantillons s'observent en fonction des différents diamètres.



**Figure 107. ACP à chaque temps de décomposition (a) plan ½ de l'ACP à T0 (n= 24 ; variance expliquée = 90 %), (b) plan ½ de l'ACP à T2 (n=24 ; variance expliquée = 93 %), (c) plan ½ de l'ACP à T4 (n=24 ; variance expliquée = 97 %) \_ (M = mélèze ; Ps = pin sylvestre)**

Aux stades T0 (Figure 107a) et T2 (Figure 107b), de petits groupes correspondant aux diamètres 03 et 05 des échantillons de mélèze se détachent des diamètres 08 et 10. Au stade T4 (Figure 107c), il semblerait que ce décrochement des échantillons liés aux diamètres soit moins marqué. La PC1 qui représente 89% de la variance expliquée permet de discriminer clairement les deux espèces. Cette observation est peut être due à l'avancement de l'état de décomposition.

**Analyses prédictives****Prédiction des classes de temps de décomposition des racines (PLS-DA)**

Trois modèles PLS-DA ont été développés pour la prédiction des classes de temps de décomposition (Tableau 37). Ces modèles ont permis de prédire chaque classe (T0, T2 et T4) par rapport à toutes les « autres » avec une bonne corrélation ( $R^2$  - proche de 1), une faible erreur de calibration (SEC – proche de 0) et de prédiction (SEP – proche de 0) et un faible biais de prédiction (proche de 0).

**Tableau 37. Statistiques des modèles prédictifs (PLS-DA) pour la prédiction des classes de temps de décomposition**

Variables prédites	T0	T2	T4
<b>Nombre de facteur</b>	10	11	11
<b>R<sup>2</sup> (Calibration)</b>	0.963	0.966	0.974
<b>SEC</b>	0.127	0.122	0.108
<b>R<sup>2</sup> (Prédiction)</b>	0.928	0.930	0.969
<b>SEP</b>	0.181	0.186	0.122
<b>Biais (Prédiction)</b>	-0.014	0.025	-0.002

Les matrices de confusion (Tableau 38) montrent qu'aucun échantillon n'a été mal classé.

**Tableau 38. Matrices de confusion des modèles prédictifs de régression PLS-DA des classes de temps de décomposition (n=24)**

		n=échantillons	Classes prédites – NIR	
			T0	Autres
Classes réelles	T0	8	8	0
	Autres	16	0	16
			T2	Autres
	T2	8	8	0
	Autres	16	0	16
			T4	Autres
T4	8	8	0	
Autres	16	0	16	

**Prédiction des classes « espèces » sur l'ensemble des temps de décomposition (régression PLS-DA)**

Deux modèles PLS-DA ont été développés pour la prédiction des classes de temps de décomposition (Tableau 39). Ce modèle a permis de prédire chacune des deux espèces étudiées (mélèze et pin sylvestre) par rapport à toutes les « autres » avec une bonne corrélation ( $R^2$  - proche de 1), une faible erreur de calibration (SEC – proche de 0) et de prédiction (SEP – proche de 0) et un faible biais de prédiction (proche de 0).

**Tableau 39. Statistiques des modèles prédictifs (PLS-DA) pour la prédiction des espèces**

Variables prédites	Mélèze	Pin sylvestre
<b>Nombre de facteur</b>	8	7
<b>R<sup>2</sup> (Calibration)</b>	0.973	0.950
<b>SEC</b>	0.117	0.158
<b>R<sup>2</sup> (Prédiction)</b>	0.975	0.954
<b>SEP</b>	0.112	0.153
<b>Biais (Prédiction)</b>	-0.029	-0.017

Les matrices de confusion (Tableau 40) montrent qu'aucun échantillon n'a été mal classé.

**Tableau 40. Matrice de confusion du modèle prédictif de régression PLS-DA des espèces (n=24)**

		n=échantillons	Classes prédites – NIR		
			Mélèze	Autres	
Classes réelles	Mélèze	12	12	0	
	Autres	12	0	12	
			Pin sylvestre	Autres	
	Pin sylvestre	12	12	0	
		Autres	12	0	12



### ***ANNEXE 3. Répétabilité de la mesure de densité sèche par déplacement d'eau***

Nous montrons ci-dessous la répétabilité de la méthode d'évaluation de la densité des échantillons de racine par déplacement d'eau en prenant l'exemple de la série d'échantillons de racine de chêne à T0 (Tableau 41). Après trois répétitions de la mesure de densité, nous calculons la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation. Les faibles écarts types ainsi que les faibles coefficients de variation obtenus montrent que la méthode est fiable au vue de sa reproductibilité pour chaque échantillon.

**Tableau 41. Mise en évidence de la répétabilité de la méthode d'évaluation de la perte de densité par déplacement d'eau pour les échantillons de chêne à T0.**

	<b>C T0 03</b>	<b>C T0 05</b>	<b>C T0 08</b>	<b>C T0 10</b>
<b>Densité 1</b>	0,591	0,632	0,611	0,593
<b>Densité 2</b>	0,594	0,634	0,610	0,591
<b>Densité 3</b>	0,595	0,635	0,612	0,591
<b>Moyenne</b>	0,593	0,634	0,611	0,592
<b>Ecart type</b>	0,002	0,002	0,001	0,001
<b>Coefficient de variation</b>	0,004	0,003	0,001	0,002

**ANNEXE 4. Tableaux synthétiques issus de l'AMDE pour l'identification des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente rassemblant les indicateurs associées à chaque fonction d'un ouvrage hydraulique en remblai à charge temporaire ou permanente**

**Tableau 42. Tableau de synthèse de l'AMDE rassemblant les indicateurs associés à chaque fonction pour la partie N°2 « Couronnement aval » d'un ouvrage hydraulique à charge temporaire ou permanente**

N°	Zones de l'ouvrage	Fonctions	Indicateurs d'état
2	Couronnement aval	<p>1 – Résister aux sollicitations mécaniques</p> <p>1.1 Résister à la déstructuration du remblai</p> <p>1.2 Résister à l'affouillement</p> <p>2 – Limiter les flux hydrauliques</p> <p>2.1 Limiter les eaux d'infiltrations</p>	<p>Port des arbres</p> <p>Aspect de la population d'arbre</p> <p>Densité d'individus</p> <p>Volume racinaire par individu</p> <p>Type de structure racinaire par individu</p> <p>Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu</p>

**Tableau 43. Tableau de synthèse de l'AMDE rassemblant les indicateurs associés à chaque fonction pour la partie N°3 « Talus aval » d'un ouvrage hydraulique à charge temporaire ou permanente**

N°	Zones de l'ouvrage	Fonctions	Indicateurs d'état
3	Talus aval	<p>1 – Résister aux sollicitations mécaniques</p> <p>1.1 Résister à la déstructuration du remblai</p> <p>1.2 Résister à l'affouillement</p> <p>2 – Limiter les flux hydrauliques</p> <p>2.1 Limiter les eaux d'infiltrations</p>	<p>Port des arbres</p> <p>Aspect de la population d'arbre</p> <p>Densité d'individus</p> <p>Volume racinaire par individu</p> <p>Type de structure racinaire par individu</p> <p>Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu</p>

**Tableau 44. Tableau de synthèse de l'AMDE rassemblant les indicateurs associés à chaque fonction pour la partie N°4 « Pied aval » d'un ouvrage hydraulique à charge temporaire ou permanente**

N°	Zones de l'ouvrage	Fonctions	Indicateurs d'état
4	Pied aval	<p>1 – Résister aux sollicitations mécaniques</p> <p>1.1 Résister à la déstructuration du remblai</p> <p>1.2 Résister à l'affouillement</p> <p>2 – Limiter les flux hydrauliques</p> <p>2.1 Limiter les eaux d'infiltrations</p>	<p>Port des arbres</p> <p>Aspect de la population d'arbre</p> <p>Densité d'individus</p> <p>Volume racinaire par individu</p> <p>Type de structure racinaire par individu</p> <p>Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu</p>

**Tableau 45. Tableau de synthèse de l'AMDE rassemblant les indicateurs associés à chaque fonction pour la partie N°5 « Talus et pied de digue amont » d'un ouvrage hydraulique à charge temporaire**

N°	Zones de l'ouvrage	Fonctions	Indicateurs d'état
5	Talus et pied de digue amont (uniquement pour les ouvrages à charge temporaire)	<p>1 – Résister aux sollicitations mécaniques</p> <p>1.1 Résister à la déstructuration du remblai</p> <p>1.2 Résister à l'affouillement</p> <p>2 – Limiter les flux hydrauliques</p> <p>2.1 Limiter les eaux d'infiltrations</p>	<p>Port des arbres</p> <p>Aspect de la population d'arbre</p> <p>Densité d'individus</p> <p>Volume racinaire par individu</p> <p>Type de structure racinaire par individu</p> <p>Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu</p>

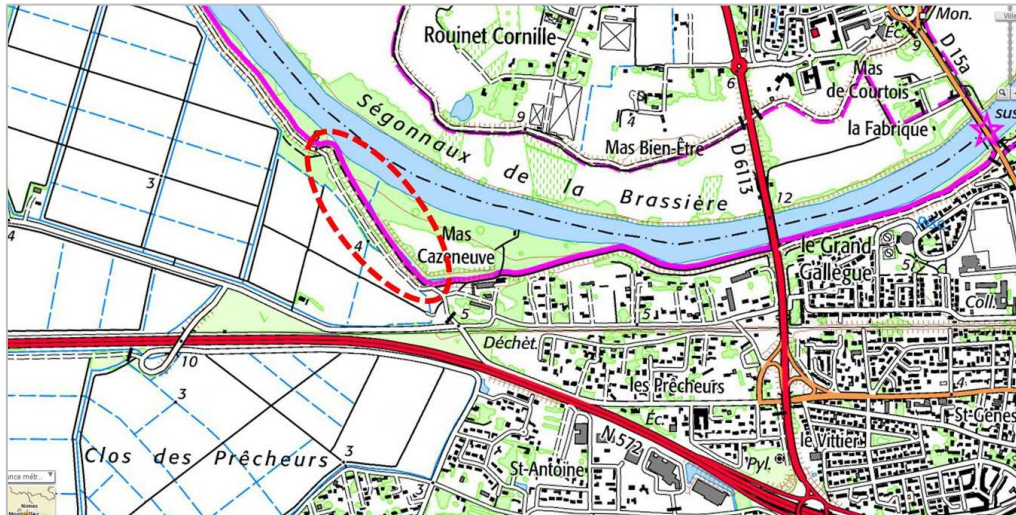
**Tableau 46. Tableau de synthèse de l'AMDE rassemblant les indicateurs associés à la fonction évacuer les flux hydrauliques pour le dispositif de drainage d'un ouvrage hydraulique à charge permanente**

N°	Zones de l'ouvrage	Fonctions	Indicateurs d'état
6	Dispositif de drainage (uniquement pour les ouvrages à charge permanente)	3 – Evacuer les flux hydrauliques	Etat visuel de l'environnement du tapis drainant

## ***ANNEXE 5. Descriptif des tronçons de digue du Petit Rhône rive gauche, secteur du Mas de Cazeneuve et secteur du bois de Beaumont***

### **Bref descriptif du tronçon de digue du Petit Rhône rive gauche, secteur du Mas de Cazeneuve**

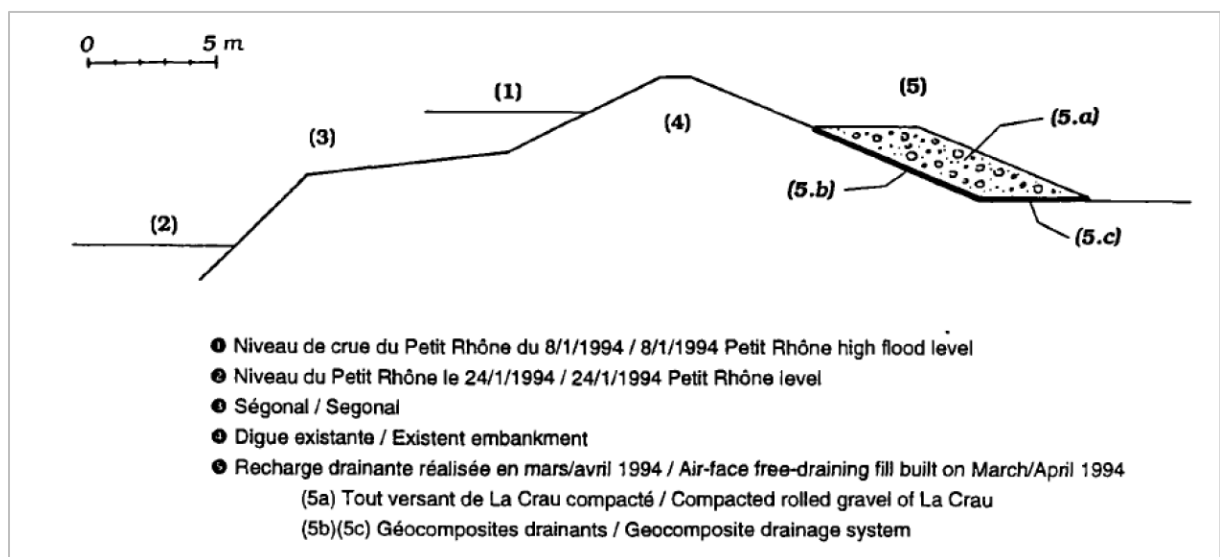
La Figure 108 illustre la localisation du tronçon en rive gauche du Petit Rhône (France, département des Bouches du Rhône).



**Figure 108. Localisation de la digue rive gauche du Petit Rhône, secteur du Mas de Cazeneuve (cercle rouge = localisation du tronçon de digue)**

Le tronçon choisi est considéré comme homogène du point de vue de ses caractéristiques géométriques, géotechniques, hydrauliques et biologiques (présence d'arbres avec densité homogène sur l'ensemble du tronçon).

Ce tronçon a la particularité de posséder une recharge réalisée suite à la crue de 1994. Ce qui lui confère une largeur crête et risberme d'environ 9 mètres (Figure 109).



**Figure 109. Coupe type de la digue rechargée dans le secteur de Trinquetaille Cazeneuve**



Les hauteurs de l'ouvrage côté eau et côté zone protégée sont d'environ 4 mètres. Les pentes des deux talus sont de 3 / 10. La distance moyenne entre la digue et le lit mineur du Petit Rhône (ségonnal) est supérieure à 50 mètres. Les sondages et essais géotechniques effectués en 2009 permettent de connaître les caractéristiques géotechniques principales du remblai et de la fondation du tronçon à évaluer.

La végétation arborescente est principalement présente en pied et sur le talus côté eau de la digue. Nous trouvons également quelques individus en pied de la recharge mais qui n'ont pas d'impact sur l'ouvrage au vue de la largeur du profil en travers. Les arbres présents sont matures. L'espèce principale est le peuplier (Figure 110).



**Figure 110.** Photo de la digue du Petit Rhône dans le secteur du Mas de Cazeneuve. Vue de la végétation arborescente côté eau que les utilisateurs des modèles sont en train d'évaluer (Photo : Curt C., 2015)

Nous observons sur le terrain quelques arbres coupés dont aucune trace de rejet n'est observée. La date de coupe de ces arbres n'est pas connue (Figure 111).



**Figure 111.** Souche morte présente sur le tronçon du Mas de Cazeneuve (Photo : Bambara G., 2015)



### **Bref descriptif du tronçon de digue du Petit Rhône rive gauche, secteur du Bois de Beaumont**

La Figure 112 illustre la localisation du tronçon en rive gauche du Petit Rhône (France, département des Bouches du Rhône).



**Figure 112. Localisation de la digue rive gauche du Petit Rhône, secteur du Bois de Beaumont (cercle rouge = localisation du tronçon de digue)**

Le tronçon choisi est considéré comme homogène du point de vue de ses caractéristiques géométriques, géotechniques, hydrauliques et biologiques (présence d'arbres avec densité homogène sur l'ensemble du tronçon). La Figure 113 montre le tronçon homogène évalué.



**Figure 113. Photo de la digue rive gauche du Petit Rhône dans le secteur du Bois de Beaumont. Vue de la végétation arborescente présente en pied de digue côté zone protégée (Photo : Bambara G., 2015)**

Les hauteurs de l'ouvrage côté eau et côté zone protégée sont comprises entre 4 et 5 mètres. La pente talus côté rivière est d'environ 3/10 et celle côté zone protégée est de 2 à 2,5/10. La distance moyenne entre la digue et le lit mineur du Petit Rhône (ségonnal) est supérieure à 50 mètres. Les sondages et essais géotechniques effectués en 2009 permettent de connaître les caractéristiques géotechniques principales du remblai et de la fondation du tronçon à évaluer.

Une ripisylve est présente entre le Petit Rhône et l'ouvrage mais ne menace pas l'intégrité de celui-ci. Nous nous intéressons aux arbres présents en pied côté zone protégée du tronçon (Figure 114). La densité d'arbres présents n'est pas dense mais ceux sont des arbres matures. L'espèce analysée sur le tronçon est le chêne.



**Figure 114. Talus côté zone protégée et chêne mature pris en compte dans l'évaluation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente (Photo : Bambara G., 2015)**

## ***ANNEXE 6. Descriptions et résultats des autres applications réalisées sur les barrages***

### **Evaluation du barrage d'O... (Italie)**

#### *Description du barrage*

Le barrage d'O... est situé dans la région de Cunéo. Il a été construit en 1962 et a pour fonction l'irrigation des cultures de kiwis.

Ce remblai est de type homogène et a été réalisé en déblai - remblai et selon les dires des propriétaires un apport en argile a permis de compléter le matériau in-situ. L'alimentation de ce barrage collinaire est naturelle. Il ne possède pas de système de drainage. Il a une hauteur d'environ 9 m pour une capacité maximale avoisinant les 34 000 m<sup>3</sup> (Figure 115). Le talus aval présente une cassure (pente de 50%) après le premier tiers du talus qui a lui une pente de 60%. A la suite de cette cassure, le talus aval a une pente avoisinant les 80 %.



**Figure 115. Vue depuis la crête du barrage d'O... (Italie)** (photo : Bambara G., 2014)

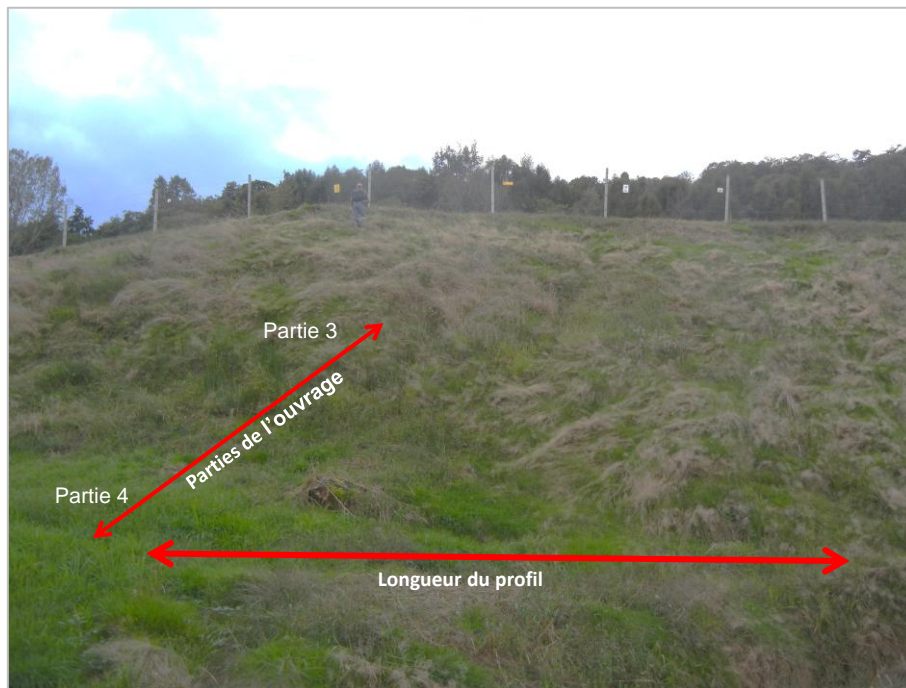
Ce barrage a fait l'objet d'une étude de calcul de stabilité et d'essais géotechniques. Les résultats ont montré que les matériaux constitutifs ne présentaient pas de cohésion, ce qui équivaut au cas le plus pessimiste dans la prise en compte de la stabilité du barrage. D'autre part, deux piézomètres sont présents, l'un en milieu de talus aval et l'autre en pied de talus aval, ainsi que des bornes topographiques en crête mais les données relatives ne sont pas relevées. Nous considérons que ce barrage n'est pas équipé d'instruments d'auscultation.

De nombreuses souches mortes sont relevées (haut de talus aval, talus aval et pied de talus). Les essences présentes ne sont pas connues. Les propriétaires témoignent de la présence de robiniers faux-acacia coupés il y a environ 6 ans mais l'état de dégradation de certaines des souches laisse présager de coupes beaucoup plus anciennes.



### Evaluation des indicateurs d'état

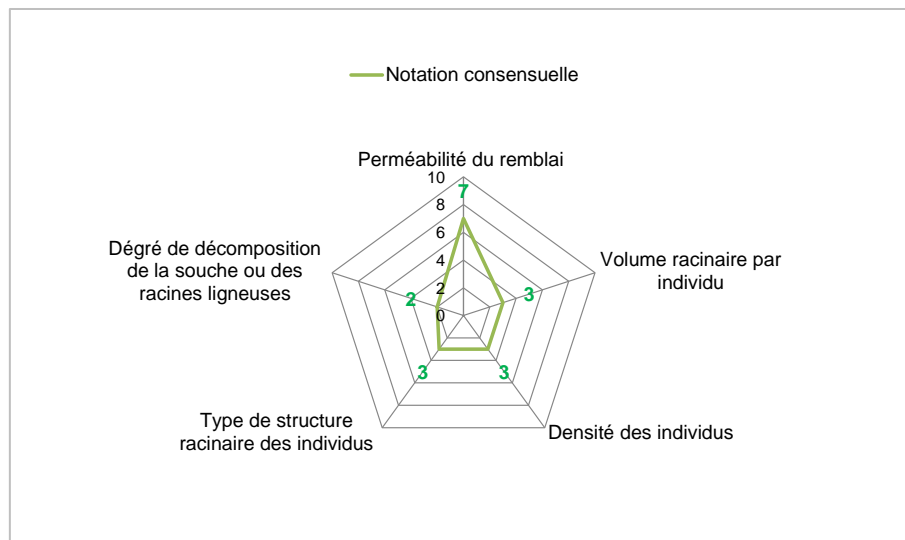
Après avoir parcouru l'ouvrage et pris connaissance de l'ensemble des informations disponibles, un profil a été choisi en pied aval de l'ouvrage (Fin de partie 3 et partie 4 - Figure 55). Ce profil a été retenu par le groupe d'experts car il est intéressant vis-à-vis de la présence de végétation arborescente (nombreuses souches en décomposition) (Figure 116).



**Figure 116. Profil choisi par le groupe d'experts pour l'évaluation de la performance du barrage d'O...vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne** (photo : Bambara G., 2014)

La végétation arborée présente en parties 3 et 4 de l'ouvrage est constituée par des souches mortes en décomposition. Ces souches sont nombreuses : entre 2 et 5 individus par 10 m<sup>2</sup>. Le diamètre de ces individus est supérieur à 30 cm.

Afin d'illustrer l'évaluation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente, nous présentons les notations réalisées sur les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance de la fonction d'étanchéité du remblai de l'ouvrage (Figure 71). Des fuites ont été observées sur le remblai. La note que les experts ont attribuée à l'indicateur direct « Fuites » fournit donc l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité (note de 1) mais ils ont également noté les autres indicateurs (notamment ceux relatifs à la végétation) permettant l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité. Nous présentons sur la Figure 117, le diagramme radar illustrant les résultats de la notation consensuelle des indicateurs par les experts.



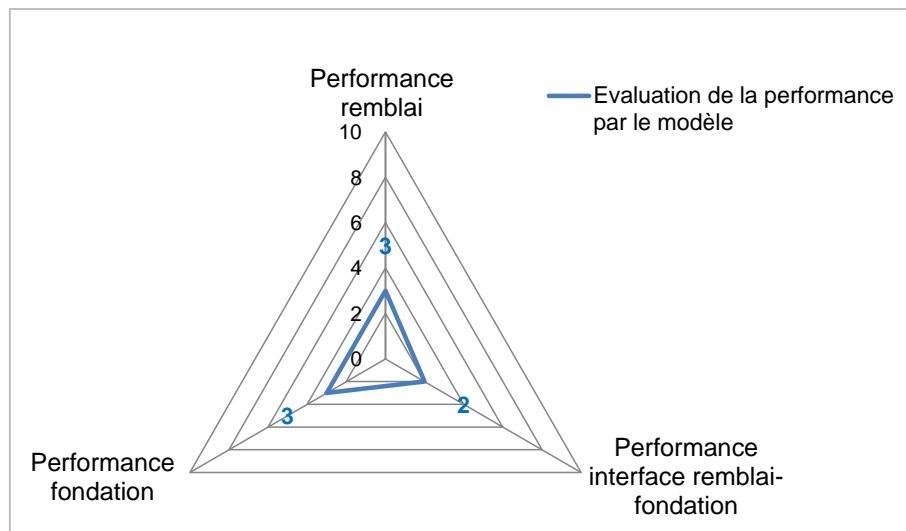
**Figure 117. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage d'O...**

L'évaluation de ces indicateurs par les experts a été réalisée selon la même procédure que pour le barrage de Grengia, c'est-à-dire conformément aux références établies lors de la formalisation des indicateurs d'état.

Evaluation de la performance des fonctions et de la performance de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne

La performance de la fonction étanchéité a été calculée par le modèle sans considérer l'indicateur d'état direct « Fuites » qui donne une note de 1 à cette fonction. Le modèle donne néanmoins une note de 2, soit une mauvaise performance de la fonction étanchéité avec ou sans considération des fuites. Si nous n'avions pas considéré la présence de végétation dans le modèle, la performance de la fonction aurait été de 7 soit une performance passable. La prise en compte de la végétation permet donc d'évaluer cette fonction au plus proche de la réalité sachant que les experts ont considéré sans utilisation du modèle que la performance de cette fonction était mauvaise (note donnée de 2).

Nous présentons sur la Figure 118, les évaluations de la performance du remblai, de l'interface remblai-fondation et de la fondation meuble vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne obtenues par le modèle.



**Figure 118. Evaluation de la performance du barrage d'O...**

Nous notons que les notes de performances obtenues par le modèle reflètent l'opinion des experts vis-à-vis de la sécurité de cet ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne.

Finalement, le modèle indique que le barrage d'O... présente une mauvaise performance (Figure 118) vis-à-vis de ce mécanisme. Les trois composants du barrage ont une performance similaire.

Pour le remblai, l'interface et la fondation, cette performance mauvaise de 3 s'explique par la présence de nombreuses souches en décomposition sur le profil analysé qui dégrade considérablement la performance de la fonction étanchéité. Elle s'explique également par la performance médiocre de la fonction de résistance à l'érosion interne (note obtenue de 4 pour le remblai et la fondation et de 3 pour l'interface), qui une fois agrégée par le modèle à la performance de la fonction étanchéité ramène à une mauvaise évaluation de la performance de chacun des composants vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne.

## **Evaluation du barrage d'A... (Italie)**

### *Description du barrage*

Le barrage d'A... est situé dans la région de Cunéo. Ce barrage a été construit en 1969, il appartient à une société productrice d'hydroélectricité.

Ce barrage en remblai dispose d'un masque amont en béton conventionnel. La cuvette est également en béton. La pente moyenne du talus aval est de 60 % (mesure au clisimètre lors de la visite). Il ne possède cependant aucun système de drainage, ni d'instruments d'auscultation relevés.

Une végétation arborescente existe sur le couronnement et le talus aval de l'ouvrage (Figure 119). Différentes essences sont présentes, disposées plus ou moins en alignement. Nous y rencontrons des saules, des érables, des pins, des peupliers matures ainsi que de nombreux rejets en crête, des bouleaux,... Nous observons certaines souches coupées et en état de décomposition plus ou moins avancé. Environ deux coupes par an sont réalisées en crête afin de dégager celle-ci de la végétation herbacée et arbustive.



**Figure 119. Vue depuis la crête du barrage d'A... (Italie)** (photo : Bambara G., 2014)

### *Evaluation des indicateurs d'état*

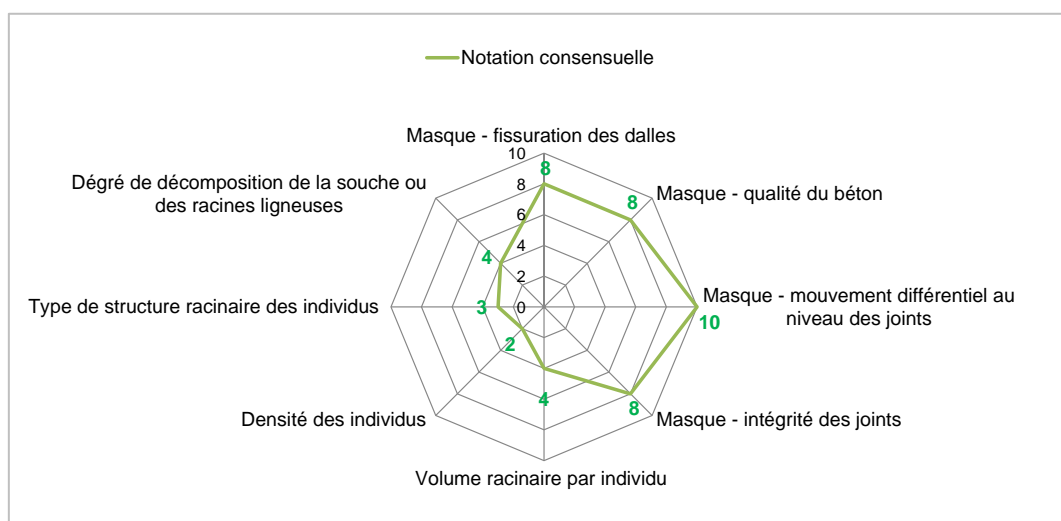
Après avoir pris connaissance de l'ensemble des informations disponibles, un profil a été choisi par les experts. Ce profil a été retenu car il est intéressant vis-à-vis du diagnostic de la végétation arborescente et qu'il est situé sur une partie de l'ouvrage où le profil est plus étroit (Figure 120).



**Figure 120.** Profil choisi par le groupe d'experts pour l'évaluation de la performance du barrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion (a : profil vu depuis la crête ; b : profil vu depuis le pied aval ; c : arbre mort sur le profil analysé) (photo : Bambara G., 2014)

La végétation arborée sur ce profil est présente sur le couronnement aval, le talus aval et le pied de talus aval. La densité des individus est élevée : de 2 à 5 individus par 10m<sup>2</sup>. Il est difficile de percevoir la présence éventuelle de souches, étant donnée la forte présence de végétation arbustive sur le profil (Figure 120). Plusieurs espèces sont présentes, on y retrouve deux peupliers, des frênes, des érables...

Afin d'illustrer l'évaluation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente, nous présentons les notations réalisées sur les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité du remblai de l'ouvrage (Figure 121). L'évaluation de cette fonction fait appel aux indicateurs d'état relatifs à un barrage en remblai avec un masque amont en béton conventionnel explicité dans le Tableau 31.



**Figure 121.** Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage d'A...

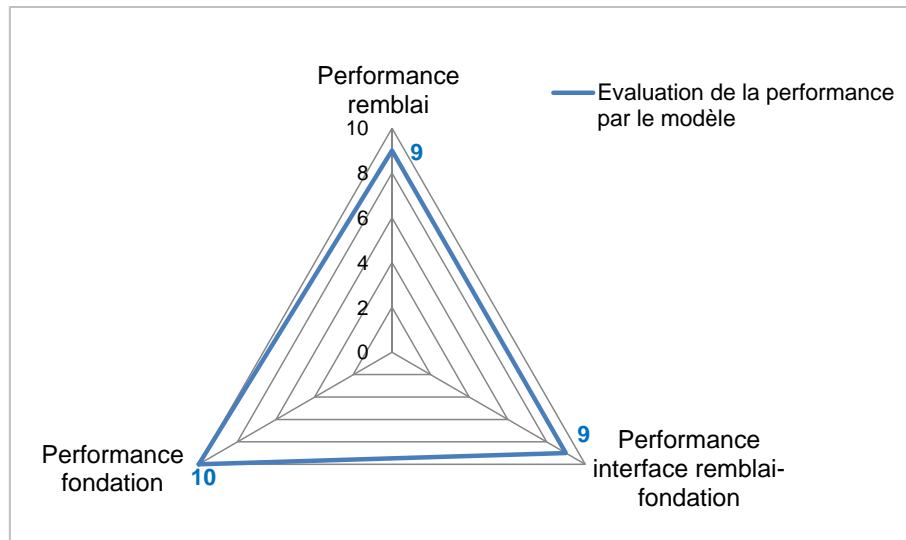


L'évaluation de ces indicateurs par les experts a été réalisée conformément aux références établies lors de la formalisation des indicateurs d'état.

*Evaluation de la performance des fonctions et de la performance de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne*

La performance de la fonction étanchéité a été calculée par le modèle. La note obtenue est de 4.

Nous présentons sur la Figure 122 les évaluations de la performance du remblai, de l'interface remblai-fondation et de la fondation meuble vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne obtenues par le modèle.



**Figure 122. Évaluation de la performance du barrage d'A...**

Pour le remblai, la performance est évaluée comme bonne, car même si la performance de la fonction étanchéité était évaluée comme médiocre au vu de la prise en compte de la présence de la végétation arborescente, la performance de la fonction de résistance à l'érosion interne a été évaluée comme bonne (note obtenue de 9). Ceci est lié au fait que ce barrage est étanché par un masque amont en béton, béton qui se prolonge au sein de toute la cuvette.

Pour la fondation et l'interface remblai-fondation la performance vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne est également évaluée comme bonne et ce, en prenant en compte cette cuvette bétonnée.

Nous notons que les notes de performance obtenues par le modèle reflètent l'opinion des experts vis-à-vis de la sécurité de cet ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne.

## **Evaluation du barrage des G... (France)**

### *Description du barrage*

La retenue d'irrigation des G... est située à une altitude d'environ 1255 m dans les Hautes Alpes (Figure 123). Elle appartient à l'ASA de P..P... La première mise en eau de ce barrage date de 1968. Cet ouvrage est reconnu de classe D au sens du décret du 11/12/2007. La retenue est alimentée gravitairement grâce à une conduite prenant l'eau dans le thalweg au-dessus du hameau des G... Le barrage a initialement été aménagé en déblai-remblai avec un approvisionnement ultérieur en matériau argileux pour étancher la retenue (masque amont en argile). Sa hauteur maximale de l'ordre de 6,5 m et sa largeur de crête est de 3,5 m. La capacité de la retenue est de 42 000 m<sup>3</sup>. Les pentes du talus amont et du talus aval sont respectivement de 50% et 60%. Ces mesures ont été effectuées au clisimètre lors de la visite.



**Figure 123. Vue depuis la crête du barrage des G... (France – 05) (photo : Bambara G., 2014)**

Le barrage est équipé d'un tapis drainant (Figure 124), par contre aucune mesure d'auscultation n'est réalisée sur ce barrage.



**Figure 124. Tapis drainant en pied aval du barrage des G... (France – 05) (photo : Bambara G., 2014)**

Une végétation arbustive et arborescente importante est présente sur l'ouvrage. Des travaux de déboisement avaient été réalisés début 2009. D'après le témoignage de l'auteur des coupes forestières, les essences principalement rencontrées furent : le peuplier, le chêne, le frêne et le saule. Malgré ces travaux, la végétalisation de cette retenue en 2014 est toujours importante (Figure 123), notamment en crête où une certaine densité de rejets de peupliers prolifère sur le couronnement amont et sur le couronnement aval (certains profils). Des souches mortes sont présentes (issues des travaux de déboisement de 2009), notamment sur le couronnement amont.

#### *Evaluation des indicateurs d'état*

Après avoir pris connaissances de l'ensemble des informations disponibles issues du dossier l'ouvrage et après témoignage du responsable de l'ASA de P.P., un profil a été choisi par les utilisateurs du modèle (1 ingénieur expert et un ingénieur d'étude). Ce profil a été retenu car il est intéressant vis-à-vis du diagnostic de la végétation arborescente (Figure 125).



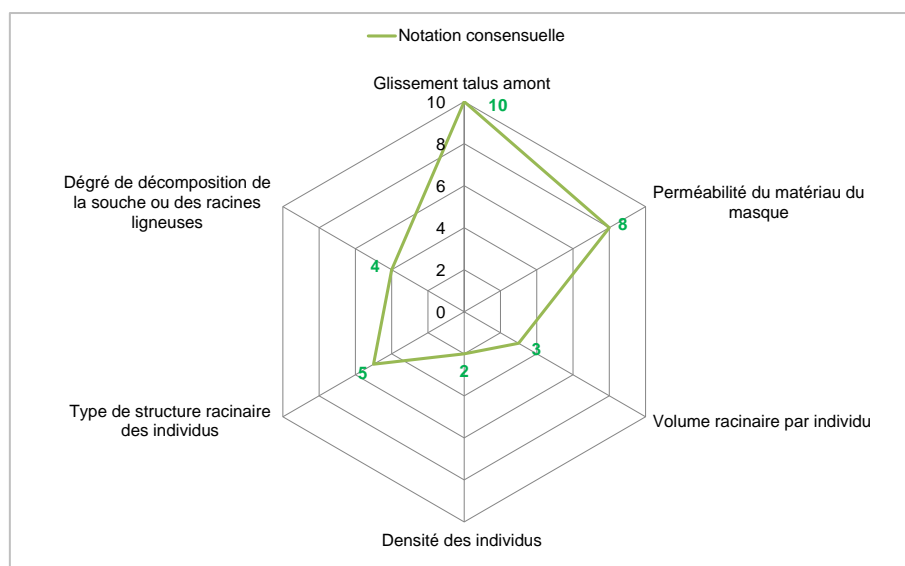
**Figure 125. Profil choisi par le groupe d'experts pour l'évaluation de la performance du barrage des G... (France) vis-à-vis du mécanisme d'érosion** (photo : Bambara G., 2014)

La végétation arborescente est présente sur les couronnements amont et aval. La densité des individus est élevée : de 2 à 5 individus par 10 m<sup>2</sup>. On y retrouve des individus vivants dont beaucoup ayant rejeté ou d'autres morts (déboisement en 2009). Le diamètre des souches est supérieur à 30 cm.

Afin d'illustrer l'évaluation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente, nous présentons les notations réalisées sur les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité du remblai de l'ouvrage. L'évaluation de cette fonction fait appel à des indicateurs d'état différents de ceux présentés sur la Figure 71 car il s'agit ici d'un barrage en remblai avec un masque amont en argile. Les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de l'étanchéité intrinsèque à l'ouvrage se rapportent à une notation vis à vis du masque amont. Ils sont les suivants :

- glissement du talus amont ;
- perméabilité du matériau du masque en argile ;
- gradient hydraulique ;
- fissures de retrait – dessiccation.

En fonction des informations disponibles, certains de ces indicateurs ne peuvent pas être évalués et, le cas échéant, on note « non renseigné » sur la fiche de notation. Le diagramme radar illustre les résultats de la notation consensuelle des indicateurs par les deux ingénieurs (Figure 126).



**Figure 126. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage des G...**

Un indicateur spécifique à la végétation arborescente intervient également dans l'évaluation de la fonction drainage. Rappelons que ce barrage est équipé d'un tapis drainant. Les experts ont donc noté les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la fonction drainage. Aucune fuite, ni indice de fuites n'ayant été observé sur le talus aval, les experts ont noté la fonction drainage sur la base de deux indicateurs d'état :

- état visuel à l'exutoire du drain. La note donnée par les ingénieurs est de 8 ;
- état visuel de l'environnement de l'exutoire du drain tapis granulaire ou du collecteur du drain. Cet indicateur d'état est relatif à la donnée « densité des individus » vis-à-vis du risque de colmatage du drain. La note donnée est de 3, soit présence de 2 à 5 individus par 10 m<sup>2</sup> dans l'environnement du tapis drainant.

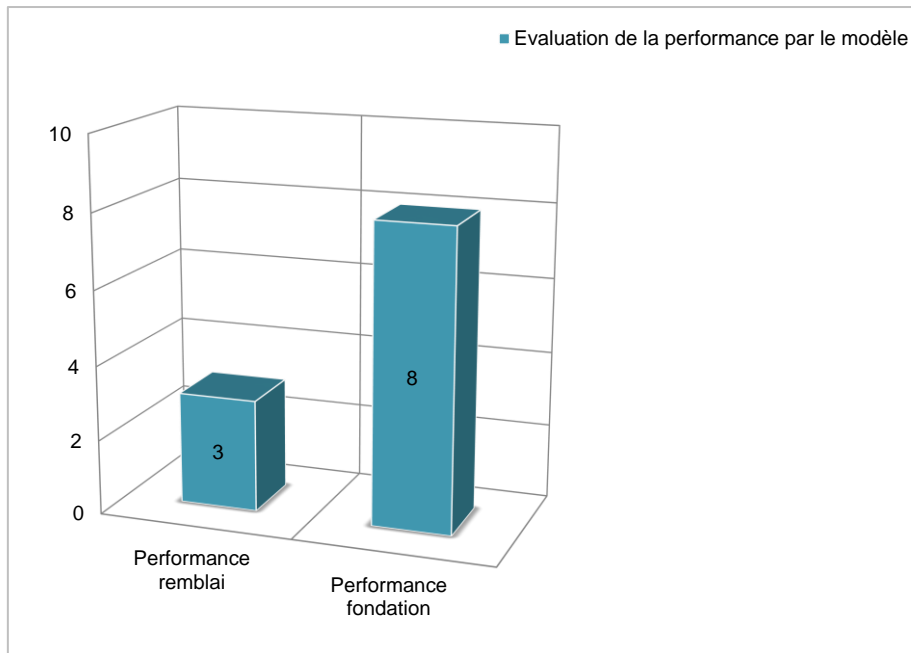
L'évaluation de ces indicateurs par les experts a été réalisée conformément aux références établies lors de la formalisation des indicateurs d'état.

#### Evaluation de la performance des fonctions et de la performance de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne

La performance de la fonction étanchéité et de la performance de la fonction drainage ont été calculées par le modèle. Leurs notes respectives sont : 4 et 3.

La performance de la fonction de résistance à l'érosion interne a également été calculés par le modèle (note obtenue : 4).

Nous présentons sur la Figure 127, les évaluations de la performance du remblai et de la fondation (nous n'évaluons pas l'interface remblai-fondation dans le cas d'un ouvrage drainé).



**Figure 127. Evaluation de la performance du barrage des G...**

La performance du composant fondation apparaît bien meilleure que la performance du remblai vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne (performance remblai : mauvaise ; performance fondation : bonne). Cette différence s'explique par le fait que la fondation n'était pas impactée par la présence de la végétation arborescente.



## **Evaluation du barrage de P..P.. (France)**

### *Description du barrage*

La retenue de P..P.. a été construite en 1966, elle appartient à l'ASA P.. P... Elle est alimentée de manière gravitaire par un lac situé en amont. C'est un barrage en remblai homogène réalisé en déblai remblai avec un matériau in-situ qui est globalement à tendance argileuse. Sa capacité est de 80 000 m<sup>3</sup>. Le profil de l'ouvrage est assez large avec une largeur de crête de 8 m et sa hauteur maximale est de 6 m (Figure 128). Les pentes relevées lors de la visite de terrain (au clisimètre) sont de 50% pour le talus aval et de 40% pour le talus amont. Cet ouvrage ne possède ni système de drainage, ni instruments d'auscultation.



**Figure 128. Vue de la retenue de P.. P.. depuis la crête (France – 05) (photo : Mériaux P., 2014)**

Nous notons la présence de végétation arborescente sur et aux abords de l'ouvrage. La retenue a fait l'objet de coupes d'arbres il y a environ 10 ans et est à présent régulièrement entretenue à raison de deux coupes par an. Par contre, des souches qui n'ont pas fait l'objet d'extraction sont présentes sur le couronnement amont de l'ouvrage et sont dans un état de décomposition avancées (Figure 129).



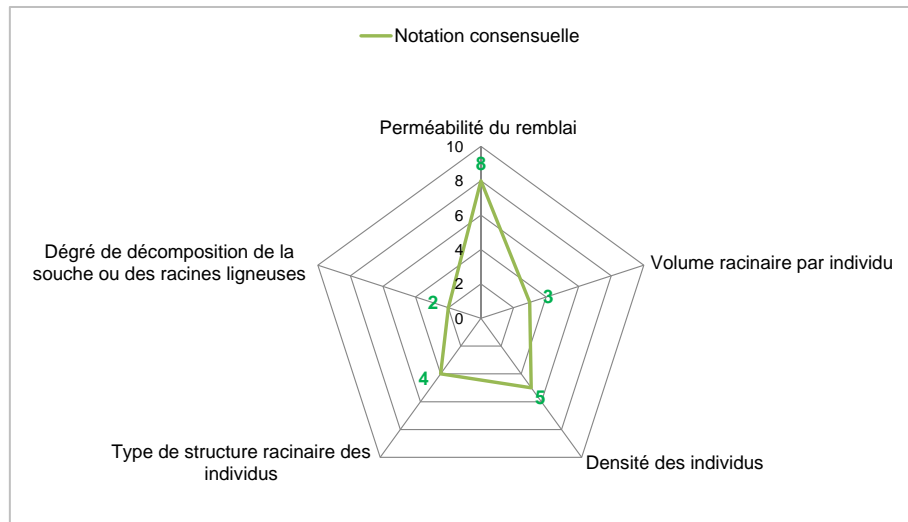
**Figure 129. Souches en décomposition sur le couronnement amont et sur la crête de la retenue de P..P..**  
(France – 05) (photo : Mériaux P., 2014)

#### Evaluation des indicateurs d'état

Après avoir pris connaissance de l'ensemble des informations disponibles essentiellement suite au témoignage du responsable de l'ASA de P.. P.... (aucun dossier d'ouvrage à notre disposition pour ce barrage), un profil a été choisi par les utilisateurs du modèle (1 ingénieur expert et un ingénieur d'étude). Ce profil a été retenu car il est intéressant vis-à-vis du diagnostic de la végétation arborescente. En effet, ce barrage relativement bien entretenu vis-à-vis de la végétation présente néanmoins sur un profil plusieurs souches en décomposition sur le couronnement amont et au milieu de la crête (Figure 129).

Nous présentons les notations réalisées sur les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité du remblai de l'ouvrage (Figure 71). Aucune fuite ou indice de fuite n'a été relevé par les ingénieurs. Le diagramme radar illustre les résultats de la notation consensuelle des indicateurs d'état nécessaire à l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité (Figure 130).

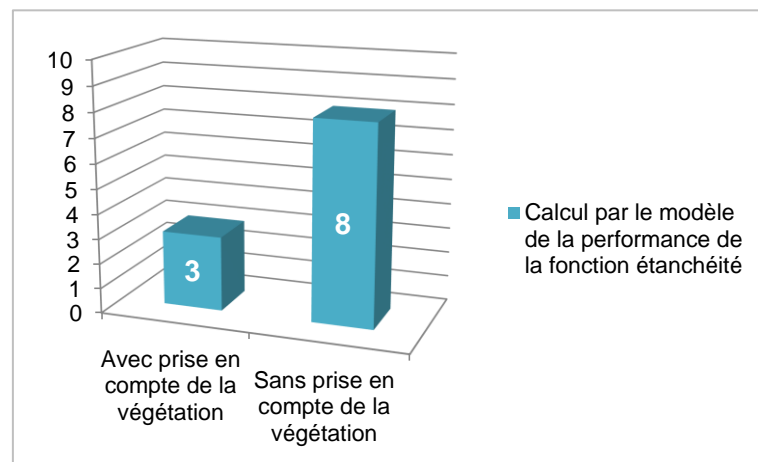




**Figure 130. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage de P.P..**

*Evaluation de la performance des fonctions et de la performance de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne*

La performance de la fonction étanchéité a été calculée par le modèle. La note obtenue est de 3 soit une mauvaise performance de cette fonction. Ce résultat a été fortement dégradé du fait de la présence de la végétation arborescente (Figure 131).



**Figure 131. Evaluation de la performance de la fonction étanchéité avec et sans prise en compte de la végétation arborescente**

L'évaluation de la performance du remblai vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne par le modèle indique une performance mauvaise (note obtenue de 3), bien que la performance de la fonction de résistance à l'érosion interne était passable (note de 6).

L'évaluation de la performance de l'interface remblai-fondation, ainsi que de la fondation vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne n'a pas pu être réalisée. En effet, les ingénieurs n'ont pas été en mesure de donner une note aux indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité de la fondation (perméabilité de la fondation) et de la fonction de résistance à l'érosion interne de la fondation (sensibilité à l'érosion interne de la fondation pour la retenue à niveau normal des eaux), faute d'informations suffisantes sur le barrage.

## **Evaluation du barrage des B... (France)**

### *Description du barrage*

Le barrage des B... a été construit en 1982. Propriété de l'ASA du R..., cette retenue a pour fonction l'irrigation pour l'agriculture du plateau du R... (Figure 132). Elle est alimentée par quelques sources en pied de versant et par le versant. C'est un ouvrage de classe C au sens du décret du 11/12/2007, avec une capacité maximale de 140 000 m<sup>3</sup>. Sa hauteur maximale est de 13 m et sa largeur de crête est d'environ 5 m.



**Figure 132. Vue du barrage des B... depuis l'amont (France - 05) (photo : Bambara G., 2014)**

La pente du talus coté amont est de 58 à 65% et la pente du talus aval, qui est constituée de deux risbermes, est de 42 % à 58% (Figure 133).



**Figure 133. Vue du talus aval et de la végétation arborescente en rive gauche du barrage des B... (France - 05) (photo : Bambara G., 2014)**

Ce barrage est constitué en remblai zoné avec un noyau étanche en argile accompagné d'une tranchée drainante inférieure. Le système de drainage permet de drainer uniquement le remblai, aucun instrument d'auscultation n'est présent.

La végétation est assez bien gérée sur cet ouvrage, le débroussaillage n'a pas été réalisé depuis 2 ans mais le propriétaire veille à éradiquer les buissons ayant tendance à devenir arbustifs. Seuls le pied de talus aval (en rive gauche) et l'appui rive gauche du barrage sont soumis au développement d'une végétation arborescente (Figure 133).

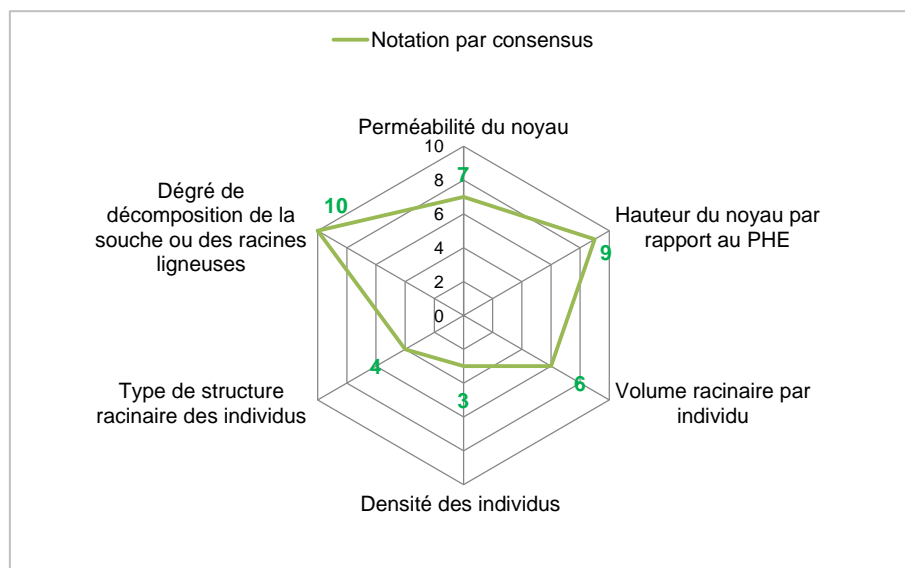
#### Evaluation des indicateurs d'état

Après avoir pris connaissance de l'ensemble des informations disponibles issues du dossier l'ouvrage et après témoignage du responsable de l'ASA du R..., un profil a été choisi par les utilisateurs du modèle. Ce profil a été retenu car il est intéressant vis-à-vis du diagnostic de la végétation arborescente et qu'il se situe sur une zone sensible du barrage : l'appui du barrage avec le terrain naturel en rive gauche (Figure 133). L'évaluation du profil est réalisée essentiellement sur les parties 3 et 4 de l'ouvrage (Figure 55).

La densité des individus est élevée : de 2 à 5 individus par 10 m<sup>2</sup>. On ne retrouve pas de souche en décomposition. Le diamètre de la souche des arbres est compris entre 10 et 15 cm.

Afin d'illustrer l'évaluation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente, nous présentons les notations réalisées sur les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité du remblai de l'ouvrage. L'évaluation de cette fonction fait appel aux indicateurs d'état relatifs à un barrage en remblai zoné avec un noyau argile (Tableau 31).

En fonction des informations disponibles, certains de ces indicateurs ne peuvent pas être évalués et, le cas échéant, on note « non renseigné » sur la fiche de notation. Le diagramme radar illustre les résultats de la notation consensuelle des indicateurs par les deux ingénieurs (Figure 134).



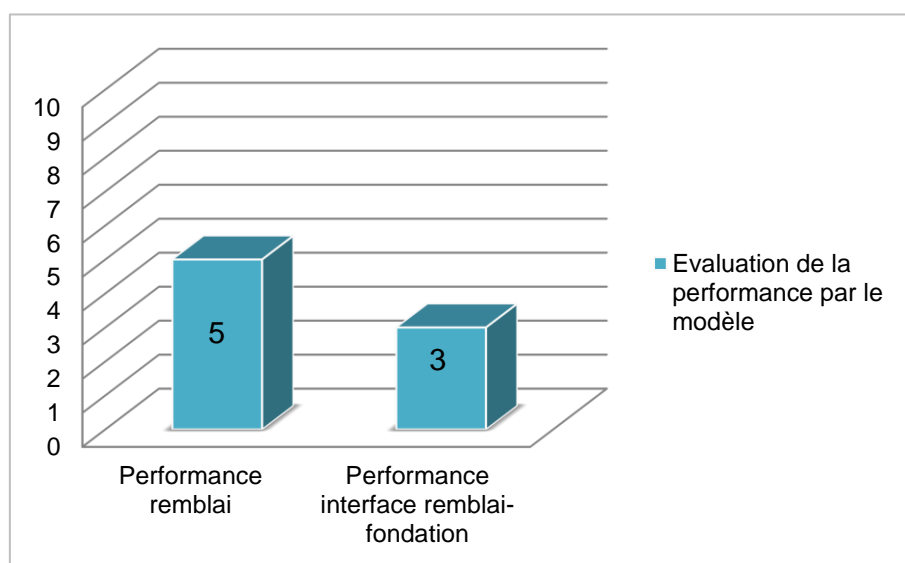
**Figure 134. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage des B...**

L'évaluation de ces indicateurs par les experts a été réalisée conformément aux références établies lors de la formalisation des indicateurs d'état.

Evaluation de la performance des fonctions et de la performance de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne

L'évaluation de la fonction étanchéité a été calculée par le modèle en considérant, d'une part, les indicateurs relatifs à la végétation arborescente (note obtenue de 5), et d'autre part sans considérer la présence de la végétation (note obtenue 7). Nous remarquons que la végétation a pour ce barrage une influence un peu moins forte que pour les autres cas de barrages analysés, ce qui est dû au fait qu'aucune souche en décomposition n'est relevée sur le profil analysé.

La Figure 135 présente les évaluations de la performance du remblai et de l'interface remblai-fondation vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne obtenues par le modèle. La performance de la fondation meuble de ce barrage n'a pas pu être évaluée car les ingénieurs n'ont pas pu noter l'indicateur « sensibilité à l'érosion interne de la fondation pour la retenue à niveau normal des eaux ». Il n'a donc pas été possible de calculer la performance de la fonction de résistance à l'érosion interne de la fondation pour ce barrage. Pour l'interface, la fonction de résistance à l'érosion de contact remblai-fondation a été donnée à dire d'expert.



**Figure 135. Evaluation de la performance du barrage des B...**

Finalement pour ce barrage le remblai présente une performance médiocre vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne alors que l'interface affiche une performance mauvaise. Ceci s'explique par une mauvaise performance de la fonction étanchéité à l'interface et une mauvaise performance de la fonction de résistance à l'érosion de contact remblai-fondation.

## **Evaluation du barrage des V... (France)**

### *Description du barrage*

Le barrage des V... a été construit en 1976. Il est la propriété de l'ASA d'Irrigation par aspersion de S-L-C.

Ce barrage qui intercepte le cours d'eau Le Riou Gras est constitué d'un remblai avec un noyau étanche incliné. Sa hauteur au-dessus du terrain naturel est de 16m. Sa capacité maximale est de 100 000 m<sup>3</sup>. Les pentes de ses talus (mesuré au clisimètre le jour de la visite) sont d'environ 45 % pour le talus amont et 40 % pour le talus aval (Figure 136).

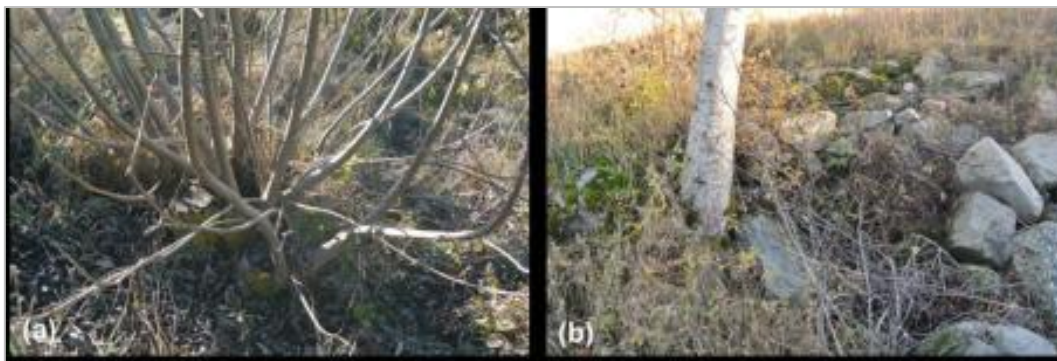


**Figure 136. Vue du barrage des V... depuis la crête (France – 05) (photo : Bambara G., 2014)**

Cet ouvrage est équipé d'un système de drainage : un tapis drainant aval horizontal et deux tranchées drainantes aval et axiale, rive à rive en fondation. Trois collecteurs de drainage arrivent dans un regard en pied aval du remblai. Aucun instrument d'auscultation n'est présent sur l'ouvrage (ni topographique, ni piézométrique). Seuls les débits de fuites peuvent être suivis qualitativement grâce au regard rassemblant les collecteurs de drainage.

Une végétation arbustive est présente sur le couronnement amont. Un certain nombre de rejets de Frêne est présent sur le couronnement aval et le talus aval de l'ouvrage, leur souche peut dépasser un diamètre de l'ordre de 40 cm (Figure 137a). Selon le témoignage du propriétaire, une coupe d'arbre a été réalisée en 2012. Nous retrouvons également aux abords du tapis drainant des arbres matures (Figure 137b).





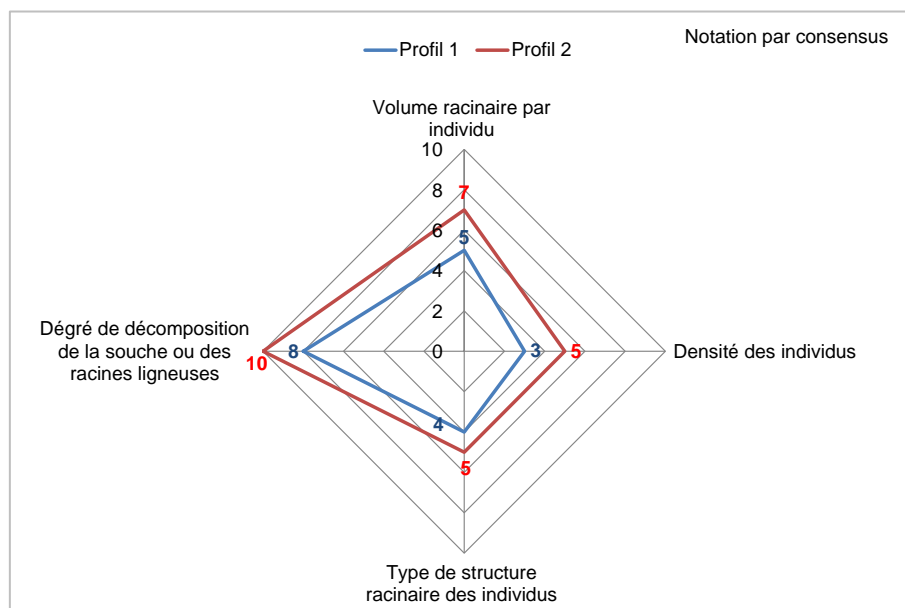
**Figure 137. Souche de frêne ayant rejeté (a) et arbre mature sur tapis drainant (b) du barrage des V... (France – 05) (photo : Bambara G., 2014)**

#### Evaluation des indicateurs d'état

Aucune information n'a pu être récoltée concernant ce barrage. Seuls les indicateurs d'état visuels ont pu être notés. Les ingénieurs ont choisi deux profils différents présentant des caractéristiques intéressantes vis-à-vis du diagnostic de la végétation.

Le profil 1 présente un certain nombre de souches de frêne rejetant (Figure 137a) et le profil 2 présente des arbres matures présents au débouché du drain tapis (Figure 137b).

Le diagramme radar illustre les résultats de la notation consensuelle des indicateurs par les ingénieurs pour les deux profils (Figure 138).



**Figure 138. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la végétation arborescente (notation consensuelle) du barrage des V... sur les deux profils**

#### Evaluation de la performance des fonctions et de la performance de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne

L'évaluation de la performance des fonctions et donc de la performance de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne n'a pas pu être réalisée, étant donné le manque d'informations que les ingénieurs avaient concernant ce barrage.

## **ANNEXE 7. Notation des indicateurs d'état du barrage de Grengia (Italie)**

**Tableau 47. Notation des indicateurs d'état pour l'évaluation de la performance du composant « fondation » du barrage de Grengia (NR : Non Renseigné)**

<b>Composant</b>	<b>Fonctions</b>	<b>Indicateurs d'état</b>	<b>Notes experts 1</b>	<b>Notes expert 2</b>	<b>Notes consensuelles</b>
<b>Fondation (zone 4 de l'ouvrage)</b>	<b>Etanchéité de la fondation</b>	<b>Fuites ou indices de fuites</b>	10	10	10
		Perméabilité de la fondation	6	6	6
		Densité des individus	10	10	10
		Volume racinaire par individu	/	/	/
		Type de structure racinaire par individu	/	/	/
		Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu	/	/	/
	<b>Résistance à l'érosion interne du remblai</b>	<b>Fontis - cône d'affaissement</b>	10	10	10
		<b>Tassement différentiels</b>	NR	NR	NR
		<b>Fuites localisées et chargées</b>	10	10	10
		Sensibilité du remblai à l'érosion interne pour la retenue à niveau normal des eaux	4	4	4

**Tableau 48. Notation des indicateurs d'état pour l'évaluation de la performance du composant « interface remblai-fondation » du barrage de Grengia (NR : Non Renseigné)**

Composant	Fonctions	Indicateurs d'état	Notes experts 1	Notes expert 2	Notes consensuelles
Interface remblai-fondation (zone 4 de l'ouvrage)	Etanchéité du remblai	<b>Fuites ou indices de fuites</b>	10	10	10
		Perméabilité du remblai	6	6	6
		Densité des individus	10	10	10
		Volume racinaire par individu	/	/	/
		Type de structure racinaire par individu	/	/	/
		Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu	/	/	/
	Etanchéité de la fondation	<b>Fuites ou indices de fuites</b>	10	10	10
		Perméabilité de la fondation	6	6	6
		Densité des individus	10	10	10
		Volume racinaire par individu	/	/	/
		Type de structure racinaire par individu	/	/	/
		Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu	/	/	/
	Résistance à l'érosion de contact remblai-fondation	<b>Fuites chargées – indices de fuites</b>	10	10	10
		Sensibilité du remblai à l'érosion interne pour la retenue à niveau normal des eaux	4	4	4



